

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Vliv nedodržení izokinetických a izoaxiálních zásad vzorkování
na výsledné hmotnostní koncentrace prachu v odpadním plynu

Influence of Non-Compliance with Isokinetic and Isoaxial Sampling
Condition on the Dust Mass Concentration in the Exhaust Gas

Student:
Vedoucí bakalářské práce:
2019

Bc. Jakub Kadlíček
Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jakub Kadlíček

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma:

**Vliv nedodržení izokinetických a izoaxiálních zásad vzorkování
na výsledné hmotnostní koncentrace prachu v odpadním plynu
Influence of Non-Compliance with Isokinetic and Isoaxial Sampling
Condition on the Dust Mass Concentration in the Exhaust Gas**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Stanovte vliv nedodržení izokinetických a izoaxiálních zásad vzorkování na výsledné hmotnostní koncentrace prachu v odpadním plynu. Práce bude obsahovat min. tyto body:

1. Přehled metod stanovení tuhých látek v odpadním plynu
2. Rešerši ne/izokinetického a ne/izoaxiálního vzorkování aerosolu
3. Experimentální stanovení vlivu neizokinetiky na výslednou koncentraci prachu
4. Experimentální stanovení vlivu natočení hubice na výslednou koncentraci prachu
5. Experimentální stanovení vlivu tvaru hubice na výslednou koncentraci prachu
6. Návrh a technický výkres izokinetického rozdělovače aerosolu a izokinetických hubic pro měření koncentrace prachu v odpadním plynu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Applications (3rd Edition) Edited by: Baron, Paul A.; Willeke, Klaus © 2001 John Wiley & Sons

ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda

ISO 9096 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda

ČSN EN ISO 23210 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace frakce PM10/PM2,5 v odpadním plynu - Stanovení nízkých koncentrací pomocí impaktorů

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z jiné strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě

.....

Podpis

Kadlíček Jakub
ČSA 457, Bohumín

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KADLÍČEK, J. 2019. *Vliv nedodržení izokinetických a izoaxiálních zásad vzorkování na výsledné hmotnostní koncentrace prachu v odpadním plynu*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí práce: Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Cílem diplomové práce je zjištění vlivu nedodržení izokinetických (rychlostních) a izoaxiálních (souosých) podmínek vzorkování odpadní vzdušiny na měřenou koncentraci pevných částic.

Teoretická část obsahuje informace o klasifikaci částic, jejich charakteristických rozměrech a metodách měření koncentrace pevných částic. Konkrétně jsou také popsány teoretické výpočty vlivů na vzorkování. V praktické části jsou popsána použitá zařízení k měření, metodika měření a výpočty nastavitelných parametrů. Výsledky měření jsou následně porovnány s teoretickými výpočty pro stejné podmínky vzorkování. V poslední řadě je vytvořen konstrukční návrh dvou součástí měřicí aparatury.

V závěru práce jsou shrnuty a vyhodnoceny výsledky práce.

Klíčová slova: pevné částice, koncentrace, proudící vzduch, popílek, vzorkování

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KADLÍČEK, J. 2019. *Influence of Non-Compliance with Isokinetic and Isoaxial Sampling Condition on the Dust Mass Concentration in the Exhaust Gas*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy. Thesis head: Ing. Jiří Horák, Ph.D.

The objective of this thesis is a detection of the influence of non-compliance with isokinetic (velocity based) and isoaxial (parallel) conditions of exhaust gas sampling on the dust concentration.

The theoretical part is dedicated to basic information about solid particles, their characteristic dimensions and concentration sampling methods. There are also described theoretical calculations of given influences on sampling. The practical part contains description of used sampling equipment, sampling methodology and calculations of initial sampling conditions. Measurement results are then compared to theoretical calculations made for the same sampling conditions. Lastly a construction design of two parts of measuring equipment is made.

In the conclusion of this thesis there is an evaluation of given results.

Key words: solid particles, concentration, flowing air, fly ash, sampling

ÚVOD	9
1. TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY	10
1.1. SLOŽENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC	10
1.2. DĚLENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC V AEROSOLU	11
1.2.1. Primární a sekundární částice	12
1.3. VLIV PEVNÝCH ČÁSTIC NA ZDRAVÍ	13
1.4. VELIKOST A TVAR PEVNÝCH ČÁSTIC	13
2. MĚŘENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC	15
2.1. METODY MĚŘENÍ KONCENTRACE ČÁSTIC	15
2.1.1. Gravimetrická metoda	15
2.1.2. Laserová difrakce	16
2.1.3. Aerodynamická spektrometrie	17
2.1.4. Selektivní separace	18
2.1.5. Ostatní metody	19
3. TEORIE VZORKOVÁNÍ EMISÍ ZNEČIŠŤENÝCH VZDUŠIN	19
3.1. VZORKOVACÍ BODY	20
3.2. ODBĚROVÉ SONDY	22
3.3. ÚČINNOST ODBĚRU VZORKU	22
3.3.1. Izoaxiální vzorkování	24
3.3.2. Anizoaxiální vzorkování	30
4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NEIZOKINETICKÝCH A NEIZOAXIÁLNÍCH VLIVŮ	35
4.1. POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	35
4.1.1. Měřicí aparatura	35
4.1.2. Odběrová hubice	36
4.1.3. Rozdělovač vzorku	37
4.1.4. Přístroj APS	38
4.1.5. Další zařízení	39
4.2. SESTAVENÍ MĚŘÍCÍ TRATĚ	41
4.2.1. Zapojení s nepřímým foukáním prášku	41
4.2.2. Zapojení s přímým foukáním prášku	42
4.3. METODA MĚŘENÍ	44
4.3.1. Izoaxiální měření	47
4.3.2. Anizoaxiální měření	48
4.4. VÝPOČET IZOKINETICKÝCH PARAMETRŮ	49
4.5. VOLBA MATERIÁLU PRO MĚŘENÍ	52
5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A TEORETICKÉ VÝPOČTY	53
5.1. VLIV NEIZOKINETIKY NA MĚŘENOU KONCENTRACI	53
5.1.1. Výsledky pro hubice s tupou hranou	54
5.1.2. Výsledky pro hubice s ostrou hranou	57
5.2. VLIV NATOČENÍ HUBICE NA MĚŘENOU KONCENTRACI	60
5.3. VLIV ZMĚNY TVARU HUBICE NA MĚŘENOU KONCENTRACI	62
5.4. TEORETICKÝ VÝPOČET NEIZOKINETICKÉHO ODBĚRU	63
5.5. TEORETICKÝ VÝPOČET ANIZOAXIÁLNÍHO ODBĚRU	66
6. POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ	68

7. NÁVRH KONSTRUKCE IZOKINETICKÉHO ROZDĚLOVAČE VZORKU A	
ODBĚROVÉ HUBICE.....	70
8. ZÁVĚR.....	71
9. SEZNAM ZDROJŮ	73
10. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
11. SEZNAM TABULEK A GRAFŮ	76
12. SEZNAM PŘÍLOH	77
13. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	78

Úvod

Měření emisí pevných látek je velmi komplexní proces a je velmi důležité pro analýzu odpadních plynů v průmyslu, zemědělství a energetice. Správné provedení měření je experimentálně náročné a jeho účelem je stanovení početní nebo hmotnostní koncentrace pevných částic, které mají negativní dopad na životní prostředí a zdraví člověka.

V první části této práce jsou popsány pevné částice z pohledu složení a charakteristických rozměrů. Dále jsou uvedeny používané metody stanovení velikosti pevných částic a jejich koncentrací v určité znečištěné vzdušině. Jsou zde také popsány vlivy na vzorkování pevných částic a příslušné výpočty účinností vzorkování.

V druhé, praktické, části práce je výklad o použitých zařízeních k měření, metodice měření a také výpočet vstupních parametrů potřebných pro správné nastavení měřicí aparatury. Následně jsou zde uvedeny a popsány výsledky všech provedených měření, které jsou dále porovnány s vykonanými teoretickými výpočty. V poslední řadě je také vysvětlen postup tvorby konstrukčního návrhu odběrové hubice a rozdělovače vzorku pro měřicí přístroj.

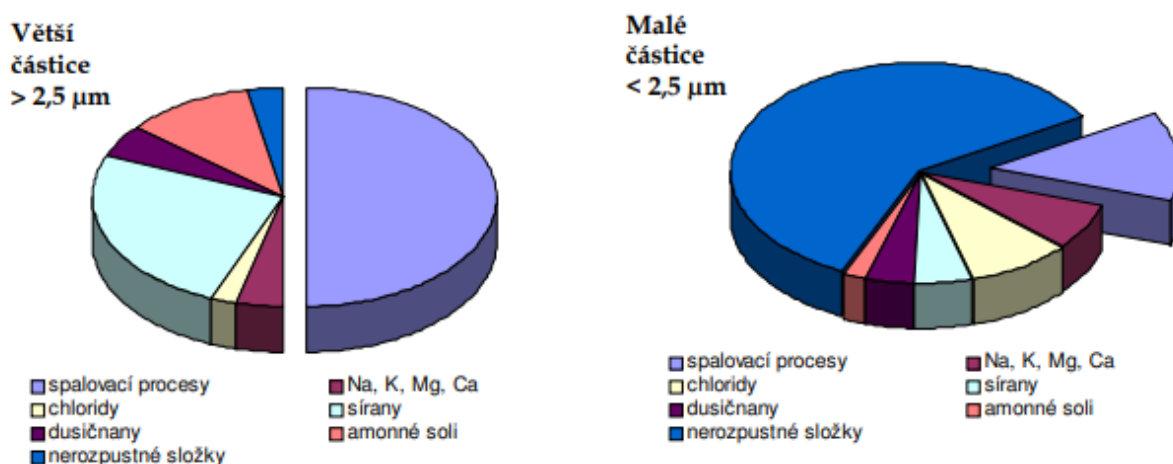
Závěr práce obsahuje shrnutí celé práce a zhodnocení výsledků měření.

1. Tuhé znečišťující látky

Tuhé znečišťující látky (TZL) jsou malé částice pevných látek, které znečišťují životní prostředí. Zdrojem TZL jsou přirozené přírodní vlivy a samozřejmě také lidská činnost – spalování paliv, průmysl, těžba surovin a další. Na Zemi se TZL vyskytují od její existence, nyní se jejich vznik a vliv na životní prostředí sleduje čím dál intenzivněji.

1.1. Složení pevných částic

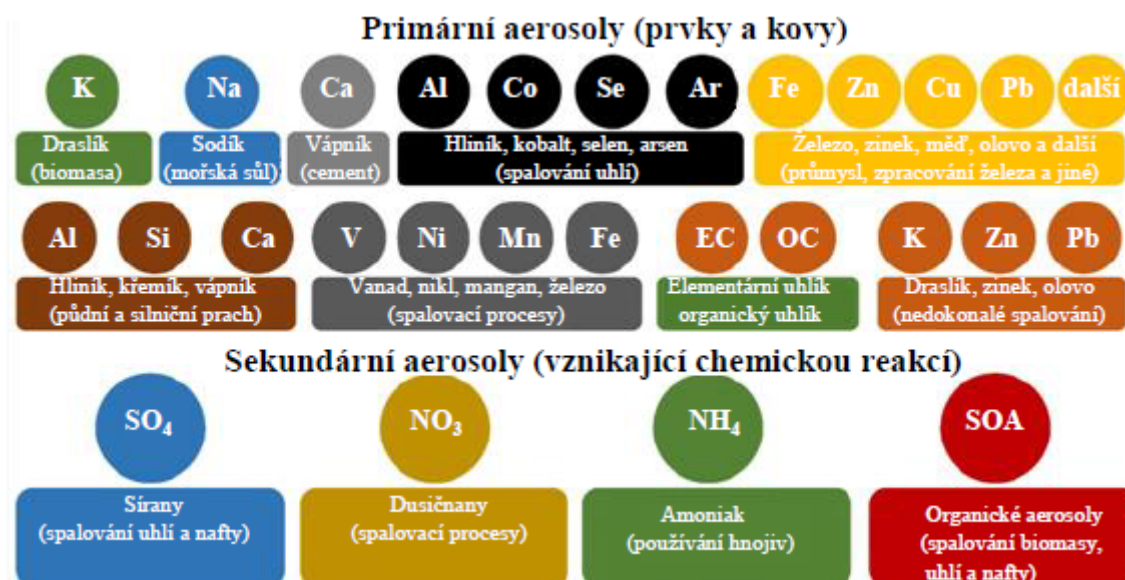
Prachové částice rozptýlené v atmosféře se liší svým složením podle způsobu jejich vzniku. Mají však typický poměr hlavních složek. Obecně obsahují hlavně organický uhlík, dusičnany a sírany (viz obrázek č. 1).



Obrázek 1 Typické poměry složek v městském prachu [3]

Pevné částice lze rozdělit podle jejich složení nebo podle jejich vzniku na primární a sekundární aerosoly (viz obrázek č. 2). Běžně mohou mimo jiné obsahovat prvky jako draslík, sodík, vápník, což nejsou nebezpečné složky. Produkty spalování uhlí obsahují naopak hliník, kobalt, selen a arsen. Při zpracování železa se do ovzduší dostávají kovy jako je železo, zinek, olovo a měď. Při spalování olejů vznikají opět produkty s jiným složením, ve kterém figuruje například vanad, nikl nebo mangan.

Dalším důležitým prvkem aerosolů je elementární a organický uhlík (z angličtiny elemental carbon a organic carbon) vznikající ve formě sazí při nedokonalém spalování organických paliv. Saze na sebe v atmosféře často navazují částice jiných látek (například aromatických benzo(a)pyrenů) a stávají se jejich nositeli. [4]



Obrázek 2 Složení pevných částic [4]

1.2. Dělení pevných částic v aerosolu

Aerosol je soubor tuhých a kapalných částic suspendovaných ve vzduchu po dostatečně dlouhou dobu pro jejich detekci.

Podle aerodynamického průměru se rozptýlené částice dělí na: [35]

- hrubé částice $Da > 2,5 \mu\text{m}$
- jemné částice $Da < 2,5 \mu\text{m}$
- submikrometrové částice $Da < 1 \mu\text{m}$
- ultrajemné částice $Da < 100 \text{ nm}$
- nanočástice $Da < 50 \text{ nm}$

Dále se mohou dělit podle druhu aerosolu: [7]

- Dým – částice o velikosti $0,1 - 1 \mu\text{m}$ vznikající při oxidačních procesech
- Kouř – částice o velikosti $0,01 - 0,5 \mu\text{m}$ vzniklé nedokonalým spalováním
- Popílek – částice mezi $1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ s původem v úletu z topenišť
- Aerosol – disperze velmi jemných částic pevných nebo kapalných od $0,01 \mu\text{m}$ do $10 \mu\text{m}$
- Prach – disperze pevných částic menších než $500 \mu\text{m}$, vznikají převážně mechanickým způsobem (otěr, drcení)

Mnohem důležitější dělení je však podle velikosti z hlediska vlivu na zdraví člověka, potažmo všech živočichů. Čím menší částice, tím se dostávají dále do těla. Dělí se podle velikosti v jednotkách μm do kategorií PM (Particulate matter).

Velikostní kategorie jsou označovány zkratkami PM_x, zahrnují veškeré částice o velikosti „x“ μm a menší. Hlavními sledovanými kategoriemi jsou PM₁₀, PM_{2,5} a PM₁. Skupina částic PM₁₀ je hlavním ukazatelem prašnosti ve sledovaném prostředí, protože zahrnuje veškeré částice menší než $10 \mu\text{m}$, čili také skupiny PM_{2,5} a PM₁.

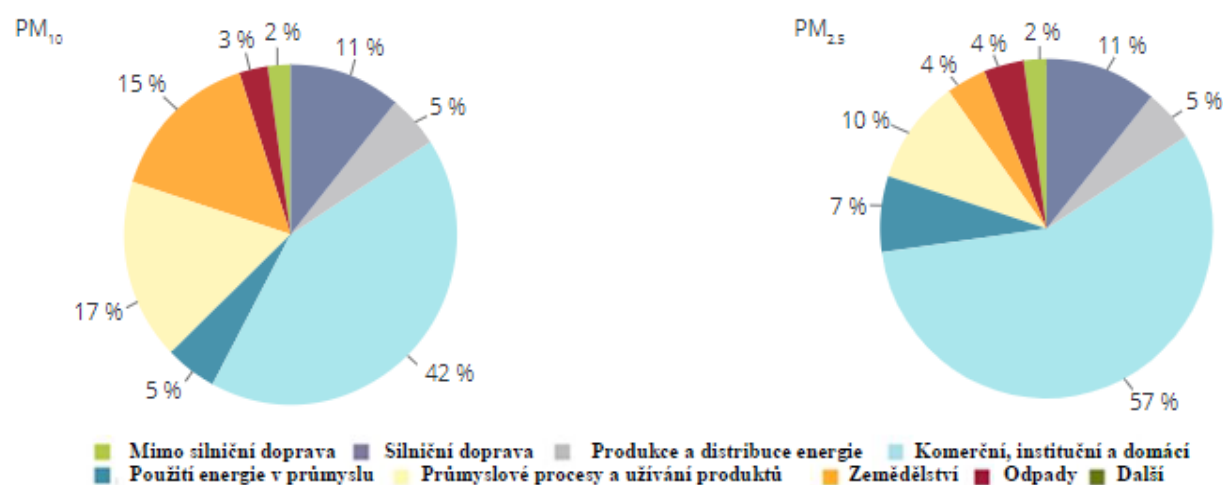
S velikostí částic souvisí jejich hmotnost, a tím pádem také jejich schopnost se usazovat nebo naopak zůstat ve vznosu v ovzduší. Usazovací rychlost $10\mu\text{m}$ částic se pohybuje v řádech desítek cm za minutu v klidném prostředí. $1\mu\text{m}$ částice zůstávají ve vznosu až 60 krát déle a nanočástice několik let. Jelikož se absolutně klidné prostředí běžně nevyskytuje, nanočástice se neusazují téměř vůbec a zůstávají ve vznosu. [5, 35]

1.2.1. Primární a sekundární částice

Primární částice vznikají přímo při určitých procesech. Dělí se podle jejich původu na přírodní a antropogenní (vznikající lidskou činností).

Mezi přírodní primární částice patří například mořská sůl rozptýlená v ovzduší v blízkosti slaných vodních ploch (moře a oceány). Dále také popel z lesních požárů a sopečných činností nebo prachové částice z hornin vzniklé větrnou erozí. [4]

Při antropogenní činnosti vznikají zcela jiné primární aerosoly. Mají původ nejen v průmyslu, ale také v dopravě, zemědělství, domácnostech nebo při nakládání s odpady. Zdaleka největší podíl na produkci primárních TZL mají domácnosti a komerční objekty (viz obrázek č. 3), hlavně z důvodu používání lokálního vytápění bez zařazení jakéhokoli filtrování nebo čištění spalín. Druhý největší podíl má sektor zemědělství, v němž hraje roli spíše složení částic než jejich počet. Problémem je zde přítomnost emisí amoniaku a metanu, což jsou významné skleníkové plyny.



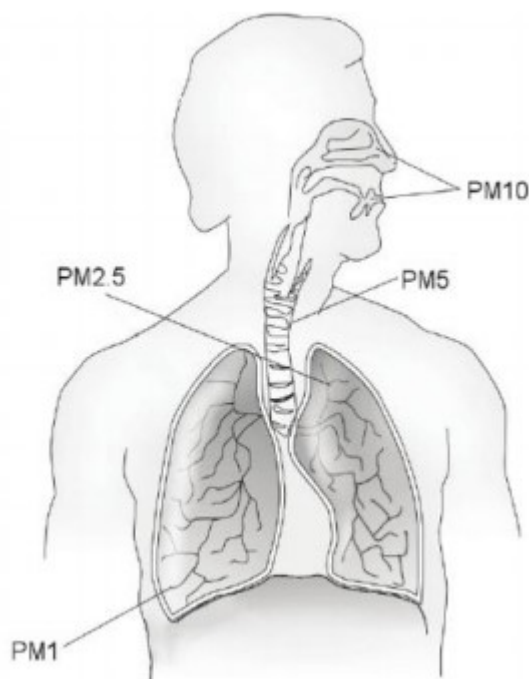
Obrázek 3 Podíl jednotlivých sektorů na množství PM₁₀ a PM_{2.5} [4]

Sekundární částice vznikají přímo v atmosféře při chemických reakcích nebo spojením produktů těchto chemických reakcí. Hlavní předchůdci sekundárních částic jsou primární produkty spalování SO₂, NO, NO₂ a NH₃, popřípadě také těkavé látky jako toluen nebo benzen. Chemickými reakcemi v atmosféře z těchto látek vznikají jejich sloučeniny, které poté mohou tvořit nové částice nebo kondenzovat na jiných částicích. Vznikají tak sekundární aerosoly. Mezi sekundární částice se zařazují také pevné částice, které se po jejich usazení opět dostávají do ovzduší například vlivem proudění vzduchu. [4,6]

1.3. Vliv pevných částic na zdraví

Mimo draslík, vápník, sodík a popřípadě také zinek se TZL skládají z anorganických a organických látek škodlivých pro lidský organismus. Do lidského těla se mohou dostat různými způsoby, například příjmem potravy, vody a dýcháním. Čím jsou vdechované částice menší, tím horší dopad na organismus mají.

Částice menší než $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}) se mohou dostat až za hrtan. Částice mezi 10 a $5\text{ }\mu\text{m}$ se zachycují v horních cestách dýchacích na sliznicích nebo na ochlupení v nosní dutině. Částice menší putují dále do plic, kde se podle velikosti usazují v průduškách ($\text{PM}_{2,5}$), pronikají do plicních sklípků (PM_1) nebo až do krevního řečiště ($\text{PM}_{0,1}$). Znázornění průniku tuhých částic je na obrázku 4. [7]



Obrázek 4 Dýchací ústrojí a tuhé částice [2]

1.4. Velikost a tvar pevných částic

Určení velikosti tuhých částic je náročné, jelikož jde o velikosti v řádech mikrometrů a také proto, že částice nemají tvar homogenní koule. Tvaru koule se přibližují pouze částice kapalné fáze. Na částice působí okolní vlivy podle jejich velikosti. Velmi malé částice v řádech nanometrů se v atmosféře pohybují Brownovým pohybem, zatímco relativně větší částice v řádech mikrometrů jsou ovlivňovány hlavně gravitačními a setrvačnými silami. Existuje řada definovaných rozměrů částic, které jsou důležité pro různé metody měření. Zavádí se obecně tzv. ekvivalentní průměr. Jde o průměr pomyslné kulové částice, která představuje stejné fyzikální vlastnosti, jako sledovaná částice. Tzv. aerodynamický ekvivalentní průměr (zjednodušeně aerodynamický průměr) je velikost standardní kulové částice o hustotě $1000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, která má stejnou volnou usa-

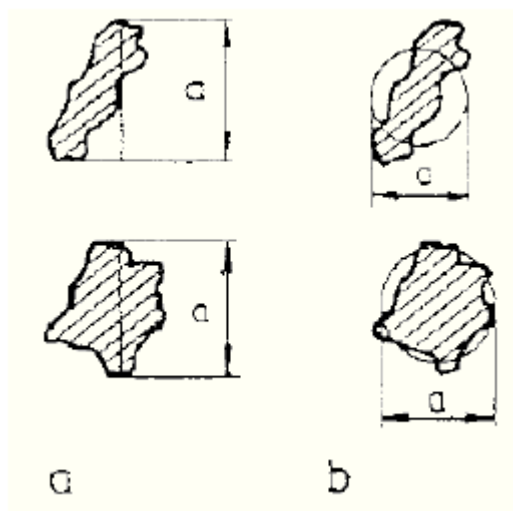
zovací rychlost pod vlivem gravitace, jako sledovaná částice. Tento průměr je relevantní pouze pro částice o velikosti větší, než $0,5 \mu\text{m}$, a je pro tuto práci nejdůležitější. Ve stejném smyslu jsou zavedeny další ekvivalentní průměry. Například difúzní průměr představující chování malých částic při Brownově pohybu nebo také optický průměr popisující schopnost částice rozptylovat dopadající světlo. [17]

Z hlediska přesného určení velikosti a tvaru jedné částice se zavádějí jiné rozměry. Jedním z nich je tzv. Feretův průměr. Ten si lze představit jako rozměr stanovený pomocí posuvného měřítka, neboli jde o rozměr částice ve zvoleném směru (obrázek č. 5a). Záleží na tvaru částice a její orientaci v prostoru. Tudiž jedna hodnota měření Feretova průměru nemá vypovídací charakter. Pro určení tvaru se zavádí tvarový faktor, tzv. poměr stran částice R (z angličtiny aspect ratio), což je poměr dvou k sobě kolmých rozměrů - maximálního Feretova průměru D_F^{max} a minimálního Feretova průměru částice D_F^{min} . [8]

$$R = \frac{D_F^{max}}{D_F^{min}} \quad (1) \quad [8]$$

Dalším rozměrem je tzv. gratikulární kruh, pomyslný kruh s daným průměrem s přibližně stejnou plochou, jako má dvourozměrná projekce částice (obrázek č. 5b). V některých literaturách je označován jako ekvivalentní průměr D_P (S je plocha projekce). [9]

$$D_P = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (2) \quad [8]$$



Obrázek 5 Znáznornění Feretova průměru a gratikulárního kruhu

Většinou se však neměří velikost jedné částice, ale distribuční velikost částic rozptýlených v proudící vzdušině. Z naměřených četností částic se poté pomocí počítačových softwarů vyhodnocují distribuční křivky podle velikosti částic.

2. Měření pevných částic

Stanovení velikosti pevných částic a jejich koncentrací je velmi důležité z hlediska snižování emisí z centrálních energetických zdrojů, potažmo koncentrace rozptýlených částic v ovzduší (imise), právě za účelem snížení dopadu na životní prostředí a zdraví obyvatel. Český hydrometeorologický ústav je mimo jiné zodpovědný za měření koncentrací pevných částic ve městech a zpracování s tím spojené statistiky ukazatele kvality ovzduší.

V energetických, hutních, těžebních a dalších provozech vzniká při daných činnostech velmi velké množství pevných částic a určování velikosti nebo jiných rozměrů jedné částice tedy není relevantní. Měřením tedy získáváme koncentrace částic rozptýlených v atmosféře (imise) nebo obsažených například ve vyfukovaných vzdušínách (emise).

Jsou definovány koncentrace několika druhů:

- Početní koncentrace vyjadřuje jednoduše přesný počet částic v jednotce objemu vzdušiny, nejčastěji v 1 m^3 nebo 1 cm^3 . Obecně lze očekávat v oblastech vesnic a měst koncentrace v řádu 10^5 v cm^{-3} , v průmyslových oblastech 10^7 v cm^{-3} .
- Hmotnostní koncentrace představuje hmotnostní podíl dané velikostní kategorie pevných částic v objemu vzdušiny. Je určována pomocí filtrování určitého objemu vzdušiny a následného zvážení usazených částic. Podle hmotnosti usazených částic na filtrech je stanovena hmotnostní koncentrace v jednotkách $\mu\text{g.m}^{-3}$ nebo mg.m^{-3} . Imisní koncentrace odpovídající čistému prostředí se pohybují okolo $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ a znečištěné prostředí obsahuje koncentrace kolem $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ a větší. V rámci hutních nebo těžebních provozů jde až o miligramy pevných částic v 1 m^3 vzduchu. [3]

2.1. Metody měření koncentrace částic

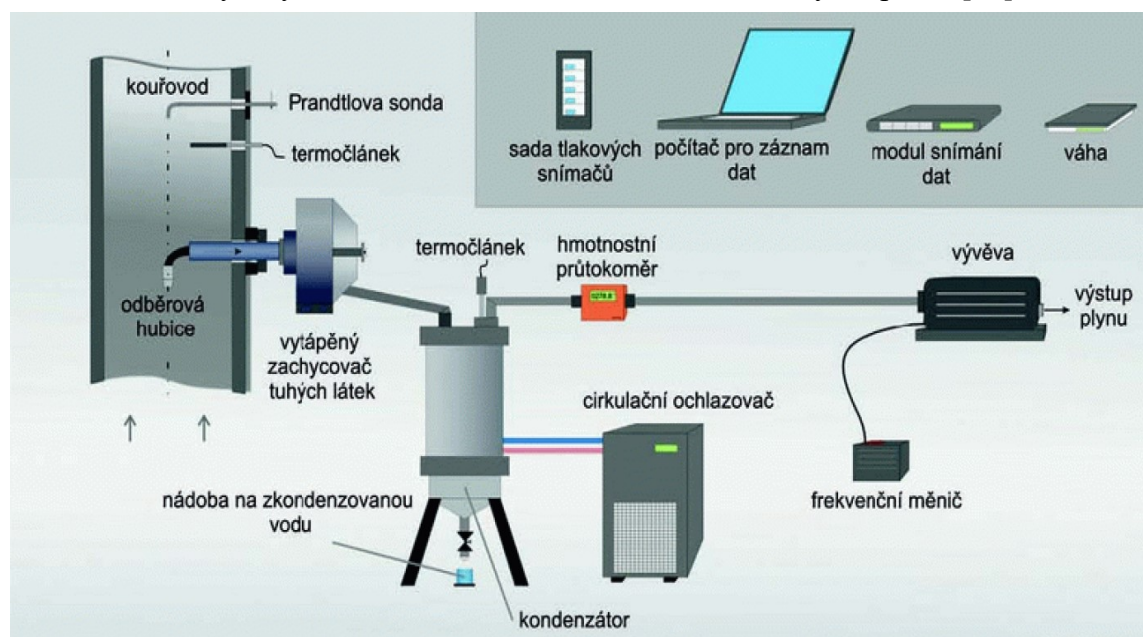
Podle druhu stanovované koncentrace jsou používány různé metody měření. Základní metodou měření hmotnostní koncentrace částic je gravimetrická metoda. Početní koncentrace částic jsou měřeny například pomocí optických, zvukových nebo setrvačných jevů při pohybu částic v proudu.

2.1.1. Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda spočívá v jednorázovém odběru vzorku z proudícího plynu s následným gravimetrickým vyhodnocením hmotnostní koncentrace částic vážením zachycených částic na filtru. Používá se pro orientační i podrobná měření. Metodu popisuje norma ČSN EN 13284-1 „Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Část 1: Manuální gravimetrická metoda“. Gravimetrické metody spoléhají na stanovení hmotnosti zachycených pevných částic. V normě jsou

specifikovány zásady provedení odběru a podmínky pro volbu vhodného odběrového místa. [13]

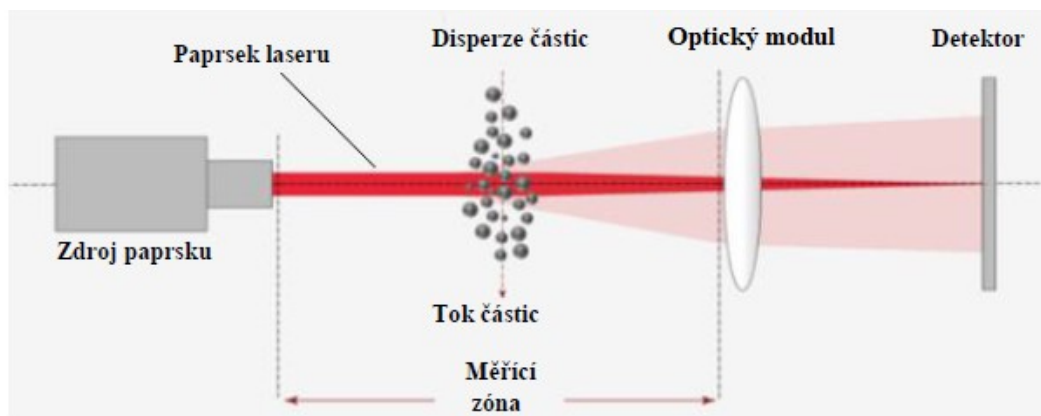
Na obrázku č. 6 je zobrazen příklad zapojení odběru vzorku znečištěného plynu. Odběrová hubice nasává spaliny obsahující pevné částice, které se ze spalin odloučí ve vytápěném zachycovači s filtrem na pevné částice. Spaliny se dále ochlazují v kondenzátoru, kde je odloučena veškerá voda díky snížení teploty pod rosný bod. V průtokoměru je měřen okamžitý hmotnostní průtok, podle kterého je nastavována výkonnost vývěvy na požadovanou hodnotu. Koncentrace částic je dána podílem hmotnosti částic zachycených na filtru a celkové hmotnosti odebraných spalin. [13]



Obrázek 6 Schéma zapojení gravimetrické metody [12]

2.1.2. Laserová difrakce

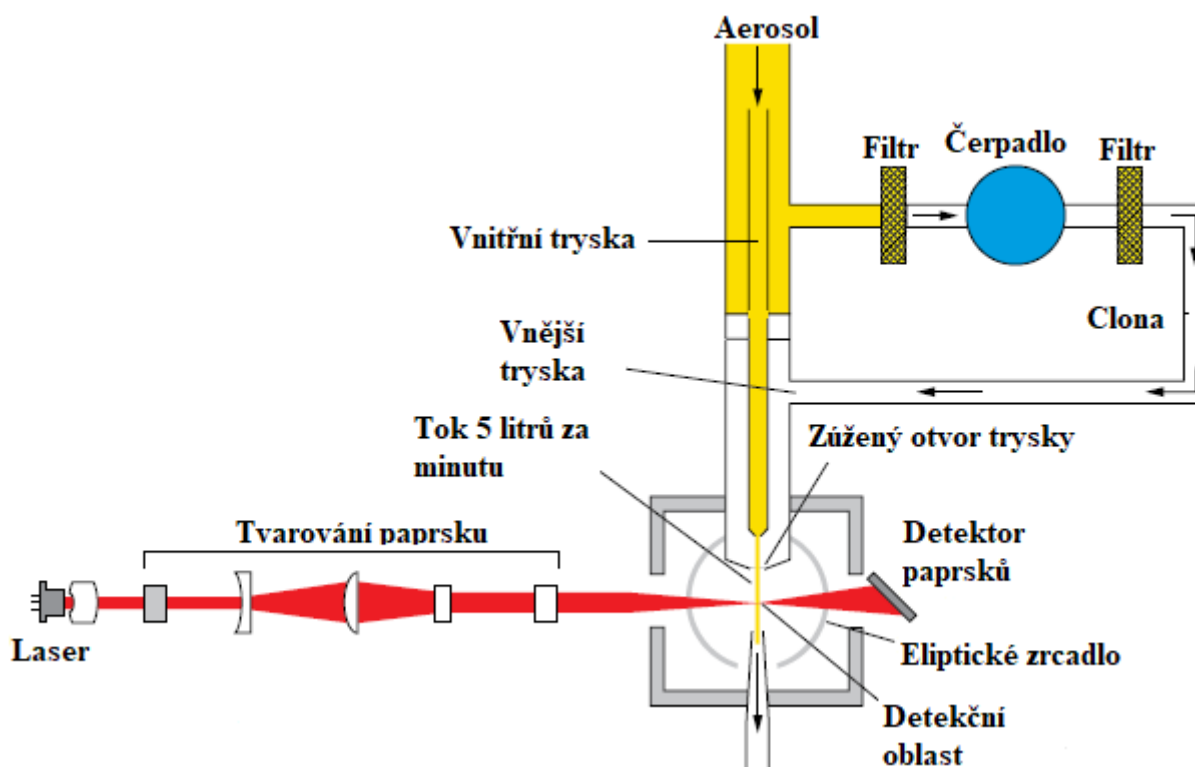
Jedná se o široce používanou kontinuální metodu měření početní koncentrace částic o velikosti v rozmezí od 0,2 μm do 2000 μm . Na obrázku č. 7 je vyobrazeno schéma laserové difrakce. Paprsek laseru prochází skrz proud disperze částic v plynu nebo kapalině, poté prochází optickým modulem, kde je usměrněn, a dopadá na detektor. Větší částice ohýbají světlo pod menším úhlem a menší částice pod větším úhlem. Detektor podle intenzity dopadajícího světla vytváří elektrické signály, které posílá do vyhodnocovacího zařízení. Podle signálů je určena velikost částic a data jsou použita k vytvoření distribuční křivky velikosti částic. [10]



Obrázek 7 Laserová difrakce [10]

2.1.3. Aerodynamická spektrometrie

Aerodynamická spektrometrie vychází z principu difrakce laserového papřsku s tím rozdílem, že měří zároveň rozptýlení světla o částice a také jejich aerodynamický průměr. Jde rovněž o kontinuální způsob měření. Na obrázku č. 8 je uvedeno schéma spektrometru APS.



Obrázek 8 Schéma aerodynamického spektrometru [32]

Čerpadlem nasávaný aerosol je rozdělen do dvou proudů v poměru 1:4. Menší část vzorku proudí přímo do zúžené vnitřní trysky, která je umístěna uvnitř větší trysky. Větší část vzorku proudí přes zúženou clonu, ve které získává větší rychlost a pokračuje právě do mezikruží vnější trysky. Před ústím trysky jsou oba proudy smíchány a pokračují do detekční oblasti. Laserový papřsek je optickými moduly tvarován a rozdělen na dva částečně se překrývající papřsky. Průchodem částice skrz oba papřsky dochází k rozptýlu světla. V detekční oblasti pod papřsky je usazeno eliptické zrcadlo, které

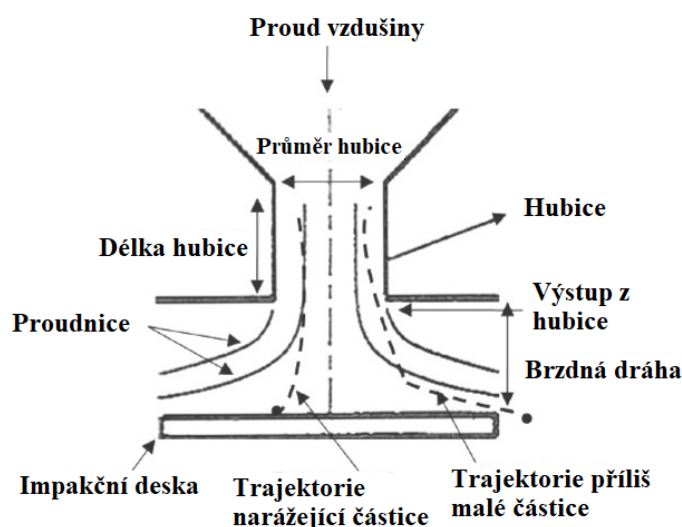
rozptýlené světlo soustředí do fotodetektoru. Ten světelné pulzy transformuje na elektrické signály. Amplituda detekovaného světelného pulzu odpovídá intenzitě rozptýlení světla o částici. [32]

Použitím dvou paprsků každá částice vytvoří dva pulzy světla a podle času mezi oběma výchylkami detekovaného světla (tzv. peak-to-peak time) je vyhodnocován aerodynamický průměr částic. Podle dimenzování přístroje na určité velikosti částic je nastavena maximální hodnota času letu například na 4 nanosekundy. Větší částice s delší dobou letu tedy nejsou zaznamenány. Velmi malé částice mají naopak tak velkou rychlost, že mohou mít zaznamenánu pouze jednu výchylku nad mezí detekce přístroje. Jsou zařazeny do kategorie velmi malých částic. [32]

2.1.4. Selektivní separace

Početní koncentrace částic o určité velikosti lze měřit pomocí tzv. impaktorů. Jsou to zařízení fungující na principu setrvačnosti částic, která je popsána tzv. Stokesovým číslem. Stokesovo číslo je vyjádřeno poměrem brzdné dráhy částice a průměru hubice impaktoru. Více informací o Stokesově čísle je uvedeno v kapitole 3.3.1.

Vzdušina je nasávána přes vstupní hubici impaktoru určitou rychlostí (viz obrázek č. 9). Proud je po průtoku hubicí stáčen kolem impakční desky. Při dané rychlosti jsou částice odkloněny svou setrvačností z proudnic a narazí do impakční desky, na které se nárazy transformují na elektrický impuls. Například je tedy možné měřit početní koncentrace částic o velikosti $>10\ \mu\text{m}$. Částice o velikosti $<10\ \mu\text{m}$ budou unášeny dále. Pro měření koncentrací PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_1 se používají tzv. kaskádové impaktory. Jde v podstatě o spojení několika impaktorů pod sebou, ve kterých se postupně zmenšují průtočné průřezy a zvyšují rychlosti proudění. Čím větší rychlost, tím menší částice budou z proudu separovány a zaznamenány při nárazu do desky. Koncentrace PM jsou dány kumulativním součtem koncentrací z určitých pater impaktoru. [35]



Obrázek 9 Schéma impaktoru [35]

2.1.5. Ostatní metody

Další metodou určování velikosti částic je obrazová analýza spočívající ve sběru snímků vzorku částic s velmi vysokým rozlišením například pomocí elektronového mikroskopu. Podle nastaveného zvětšení lze velmi přesně změřit velikost částic a určit jejich tvar (tzv. tvarový faktor). Příprava vzorku je ale zdoluhavá a elektronový mikroskop je velmi sofistikované a drahé zařízení. Tato metoda se využívá pouze ve speciálních případech.

Existuje také podobná metoda laserové difrakci, která používá místo světla zvuk. Nazývá se akustická spektroskopie a používá se k určení velikosti částic rozptýlených ve vzorku kapaliny. Na detektoru zvuku se také sleduje rozptyl zvuku způsobeným nárazy do částic, podle kterého lze získat distribuční křivku velikosti částic.

Gravitační metoda využívá gravitačních sil působících na částice v kapalném médiu, které se usazují s různou rychlostí podle jejich velikosti. Médium je v určitých intervalech monitorováno rentgenovým zářením, čímž se sledují rychlosti usazování částic. Na základě Stokesova zákona o odporu prostředí se poté určuje hmotnost částic. Je potřeba znát hustotu částic, která nemusí být stejná a předpokládá se také, že jsou částice dokonale kulaté. [11]

3. *Teorie vzorkování emisí znečištěných vzdušin*

Pro splnění podmínky shodného složení hlavního proudu média v potrubí a odbíraného dílčího proudu média odběrovou sondou je potřeba zajistit tzv. izokinetický odběr. Skutečný odběr vzorku lze přiblížit ideálnímu izokinetickému odběru použitím odběrové hubice s vhodným tvarem a rozměry a zajištěním shodné velikosti a směru rychlosti proudění v ústí odběrové hubice a rychlosti proudění média v potrubí. Poměr rychlosti v ústí odběrové hubice U a rychlosti v potrubí U_0 se nazývá izokinetický poměr ω . Tvar odběrové hubice musí při izokinetickém poměru $\omega = 1$ zajistit co nejmenší narušení průběhu proudnic vzorkovaného média. [13]

$$\omega = \frac{U}{U_0} \quad [-] \quad (3) \quad [13]$$

- U - rychlost proudění v ústí hubice $[\text{m.s}^{-1}]$
- U_0 - rychlost proudění okolního plynu $[\text{m.s}^{-1}]$

V české literatuře je používán izokinetický poměr rychlostí, naopak v zahraniční literatuře je k vyjádření rozdílu rychlostí vzdušiny používán poměr rychlostí U_0/U , který je pouze převrácenou hodnotou. [13, 17]

Při nedodržení podmínky izokinetiky lze vzorkování rozdělit na dva režimy odběru. Jestliže je rychlost v ústí hubice nižší, nastává tzv. sub-izokinetický odběr (neboli podsávání). Naopak při vyšší rychlosti vzorkování je odběr v režimu super-izokinetiky (neboli přesávání). [17]

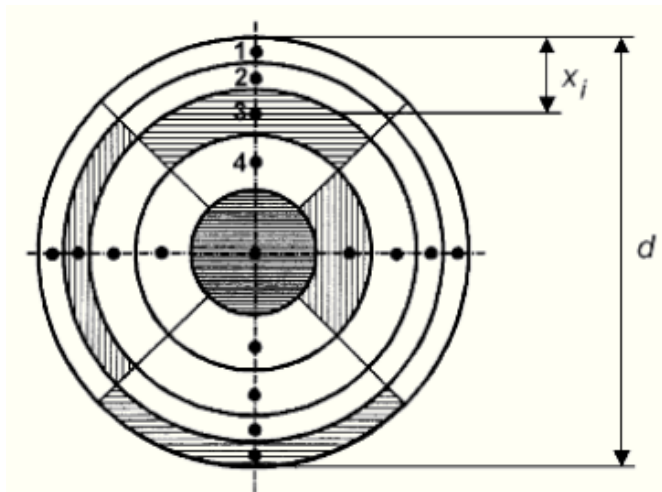
3.1. Vzorkovací body

Důležitým parametrem pro přesné měření koncentrace pevných částic je počet vzorkovacích bodů závislý na tvaru a velikosti průřezu průtočného kanálu. V tabulce č. 1 a tabulce č. 2 jsou uvedeny minimální potřebné počty vzorkovacích přímk a v nich minimální počty vzorkovacích bodů. Na obrázku č. 10 jsou zobrazeny body a přímky pro kruhové potrubí.

Plocha vzorkovacího průřezu	Průměr potrubí	Nejmenší počet vzorkovacích přímk (průměrů)	Nejmenší počet vzorkovacích bodů v rovině
[m ²]	[m]		
<0,1	<0,35	-	1 ^{A)}
0,1 až 1,0	0,35 až 1,1	2	4
1,0 až 2,0	1,1 až 1,6	2	8
>2,0	>1,6	2	Nejméně 12 a 4 na 1 m ² ^{B)}

A) Použití jediného vzorkovacího bodu může vést ke vzniku chyby přesahující hodnotu požadovanou normou
B) Pro velká potrubí zpravidla stačí 20 vzorkovacích bodů

Tabulka 1 Minimální počet vzorkovacích bodů v kruhovém potrubí [13]



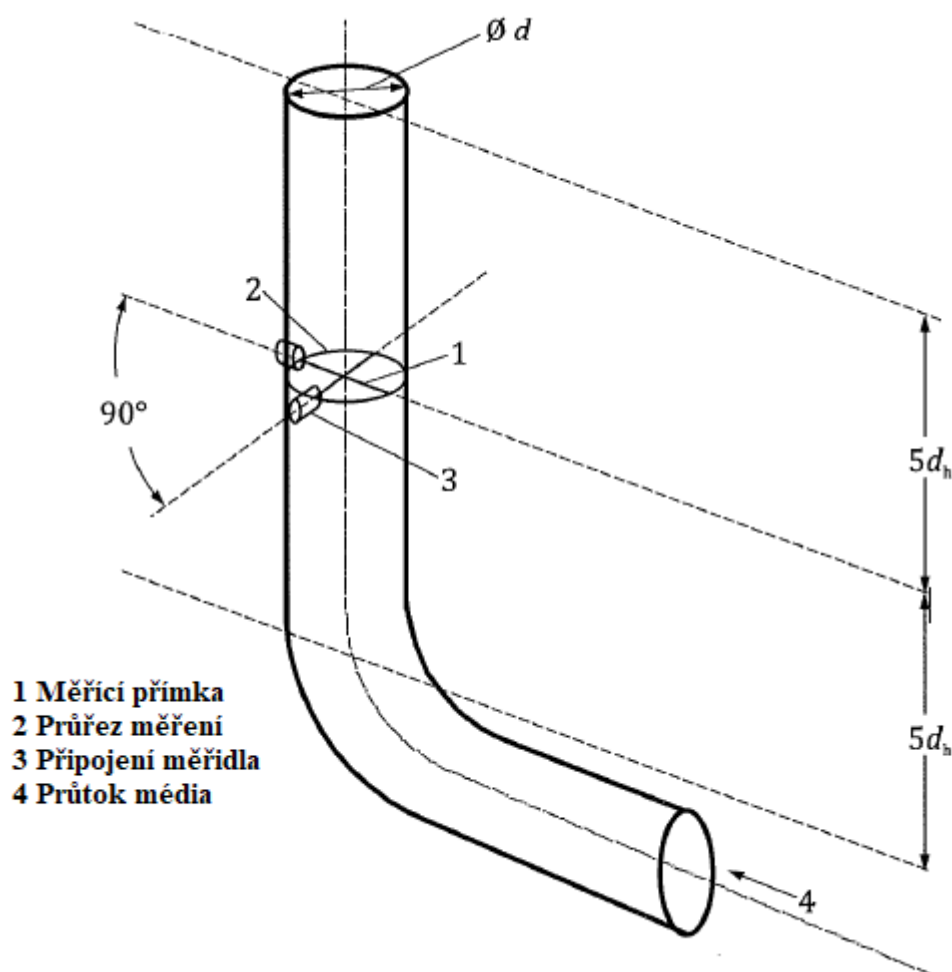
Obrázek 10 Rozmístění vzorkovacích bodů v kruhovém potrubí [13]

Plocha vzorkovacího průřezu	Nejmenší počet vzorkovacích přímk ^{A)}	Nejmenší počet vzorkovacích bodů
[m ²]		
<0,1	-	1 ^{B)}
0,1 až 1,0	2	4
1,0 až 2,0	3	9
>2,0	≥3	Neméně 12 a 4 na 1 m ² ^{C)}

A) Odlišné dělení plochy je nutné například v případě, že délka delší strany průřezu je více než dvojnásobkem
B) Použití jediného vzorkovacího bodu může vést ke vzniku chyby přesahující hodnotu požadovanou normou
C) Pro velká potrubí zpravidla stačí 20 vzorkovacích bodů

Tabulka 2 Minimální počet vzorkovacích bodů v čtvercovém potrubí [13]

Měřicí body musí být od vnitřní stěny potrubí umístěny ve vzdálenosti rovné minimálně 3 % délky měřicí přímky (pro d nebo $l > 1$ m) nebo ve vzdálenosti alespoň 5 cm (pro d nebo $l < 1$ m). Průřez měření musí být umístěn v přímém úseku potrubí s konstantním průřezem, nejlépe ve vertikálním úseku, aby nedocházelo k nerovnoměrnému rozložení frakcí částic v průřezu měření vlivem gravitačního pole, což je ještě důležitější při nízkých rychlostech proudění. Měřicí profil by se měl nacházet v místě ve vzdálenosti rovné pětinásobku hydraulického průměru od místa počátku přímého úseku potrubí a celý přímý úsek potrubí by měl být dlouhý minimálně jako sedminásobek hydraulického průměru potrubí. V případě měření před ústím prašné tratě do okolí jde celkem o délku rovnou desetinásobku hydraulického průměru (viz obrázek č. 11). [13]



Obrázek 11 Schéma umístění průřezu měření [15]

3.2. Odběrové sondy

Odběr reprezentativního vzorku pro měření TZL musí splňovat podmínky blízké teoretickému izokinetickému odběru, čímž se zajistí nenarušení proudění plynu v okolí odběrové hubice. Těchto podmínek se dá dosáhnout nejen nastavením požadovaného průtoku média odběrovou hubicí, ale také vhodnou konstrukcí odběrové sondy. Ideálně bude mít odebíraný vzorek stejnou koncentraci pevných částic a stejné granulometrické složení jako ve sledované vzdušině.

Jednoduché vytápěné sondy jsou nejjednodušší typ odběrových sond. Lze je vytáčet například elektrickou energií v případech, kdy by hrozila kondenzace vlhkosti ve vzorku. Nejsou opatřeny zařízeními pro okamžité sledování hlavního proudu v potrubí a dílčího proudu v odběru. Nastavení izokinetických podmínek tedy závisí na samostatných měřidlech umístěných v co největší blízkosti odběrové sondy.

Vytápěné kombinované sondy mají naopak v odsávací hubici nebo v její blízkosti umístěna zařízení pro měření okamžitého statického tlaku nebo teploty hlavního i dílčího proudu média. Dělí se na izokinetické sondy, které mají regulovaný průtok dílčího proudu média podle rozdílu tlaků na vnějším a vnitřním povrchu odsávací hubice, a nulové sondy, které zajišťují potřebný průtok dílčího proudu při nulovém rozdílu statických tlaků mezi vnějším a vnitřním povrchem hubice.

Speciální sondy mohou pracovat s různými již uvedenými principy. Mohou navíc obsahovat například odlučovače větších nebo naopak jemných částic z dílčího proudu, měřiče vlhkosti, měřiče průtoku atd. Lze je použít i v případě odběru vzorku média o teplotě větší než 600 °C, pokud jsou příslušně chlazeny vzduchem nebo vodou. [13]

3.3. Účinnost odběru vzorku

Odběr vzorku aerosolu z jeho prostředí vyžaduje, aby částice vstupovala do vstupu vzorkovacího systému (nejčastěji hubice) a dopravovala se do dalších částí systému (filtry, měřicí zařízení). Účinnost, s jakou se odběru dosahuje, se nazývá vstupní účinnost. Existují dvě složky vstupní účinnosti, aspirační η_{asp} a transportní η_{trans} . Tyto účinnosti jsou závislé na rychlosti okolního plynu U_0 ; velikosti, geometrii a poloze hubice; rychlosti vzorkovaného plynu U ; a aerodynamickém průměru částic d_a .

Při účinném odebrání vzorku musí být rychlost vzorkovacího plynu dostatečně nízká, aby se vzorkovaná částice mohla přizpůsobit průtoku vzorkovaného plynu na dráze srovnatelné s velikostí průměru hubice. Dokud se částice průtoku nepřizpůsobí, je v tzv. setrvačném stavu. Rychlost vzorkovaného plynu musí být zároveň dostatečně vysoká, aby se vzorkovaná částice při odběru vzorku výrazně neusazovala v odběrové trati. Musí být splněna tzv. gravitační podmínka usazování. Při odběru vzorku z proudícího plynu tryskou se tedy předpokládá, že rychlosti proudění jsou velké oproti rychlosti usazování částic. Studie Grinshpun *et. al.* poukazuje na to, že při odběru vzorků s

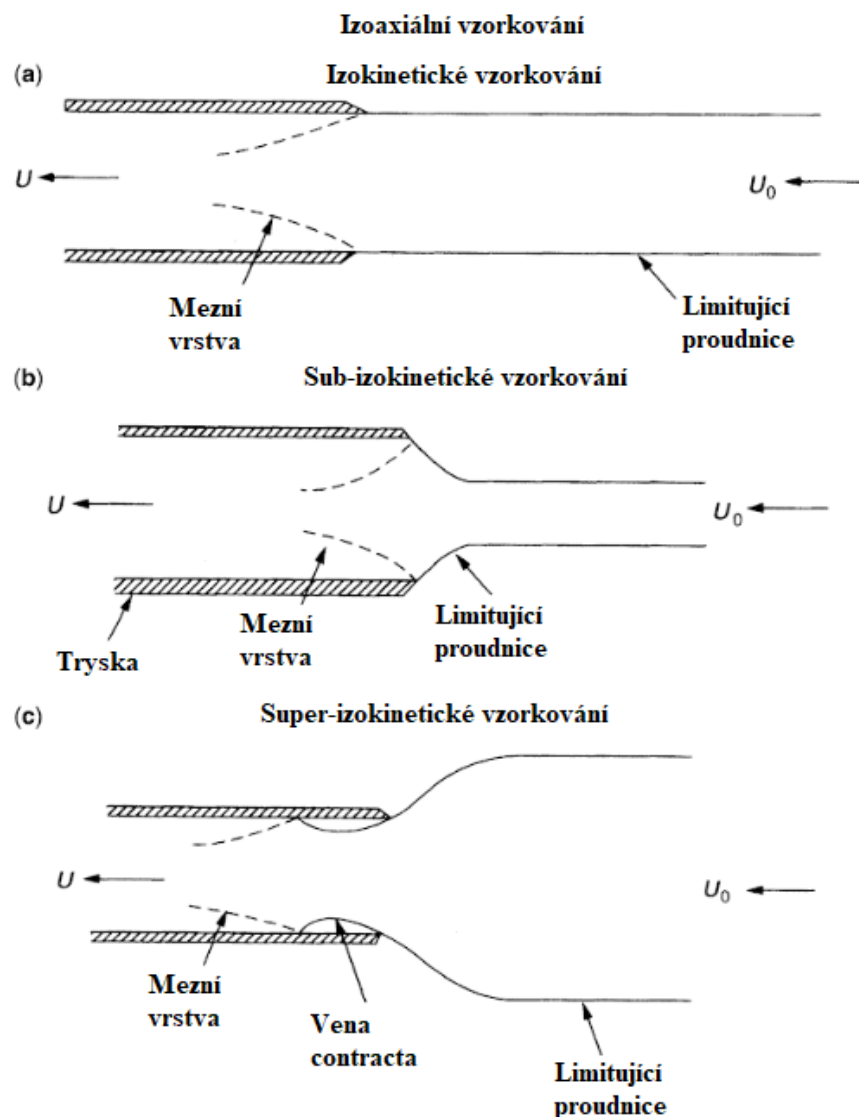
nízkou rychlostí bude účinnost odsávání záviset na poměru rychlosti usazování částic k rychlosti okolní vzdušiny. [18]

Odběr vzorků tryskou z proudící vzdušiny může být použit v různých orientacích s ohledem na gravitaci a směr proudění vzdušiny. Tryska musí směřovat proti směru proudění vzdušiny. Například tryska směřující svisle vzhůru tedy odebírá vzorek ze vzdušiny proudící svisle dolů. Vyrovnáním směru proudění vzorku a vzdušiny je docílen tzv. odběr izoaxiální. Vzorkování anizoaxiální (neboli neizoaxiální) naopak nastává, když směr proudění vzdušiny a směr proudění vzorku v hubici nejsou rovnoběžné.

Odběr vzorků je izokinetický, když je zároveň izoaxiální a střední rychlost proudění vzorku skrz vstupní průřez trysky se rovná rychlosti proudění vzdušiny v potrubí nebo kanále. Termín izokinetický zpravidla platí pouze pro laminární volné proudění v okolí odběrové trysky. Obecnější termín použitelný jak pro laminární, tak pro podmínky turbulentního proudění, je izo-středně-rychlostní vzorkování. Konvenčně se však používá termín izokinetický pro laminární i turbulentní režimy proudění. Odběr vzorků se vzorkovací rychlostí, která se nerovná rychlosti okolní vzdušiny, je anizokinetický (neizokinetický). Je-li rychlost vzorkování vyšší než rychlost vzdušiny, je vzorkování super-izokinetické (tzv. přesávání), a když je vzorkovací rychlost nižší než rychlost vzdušiny, je vzorkování sub-izokinetické (tzv. podsávání).

Na obrázku č. 12 je schematické znázornění izoaxiálního vzorkování s tenkostěnnou tryskou pro izokinetické, sub-izokinetické a super-izokinetické podmínky proudění. Limitující proudnice představuje hranici mezi vzorkem, který vstupuje do trysky a okolní proudící vzdušinou. Vzdušina, včetně částic, které nepřekročí limitující proudnice do okolního plynu, je vždy reprezentativně vzorkována. Schéma na obrázku správně platí pouze pro laminární proudění. Tato podmínka však není vždy splněna. Turbulentní proudění okolního plynu zavádí do rychlosti plynu laterální složku, která ovlivňuje pohyb částic. Schéma na obrázku č. 12 je ale kvalitativně správné v tom, jak zobrazuje průtok a transport částic do vstupu trysky pro podmínky laminárního i turbulentního proudění.

3.3.1. Izoaxiální vzorkování



Obrázek 12 Schéma izoaxiálních režimů vzorkování vzdušiny [17]

Obrázek č. 12 a) zobrazuje izokinetické vzorkování, ve kterém limitující proudnice proudí přímo do trysky bez odchýlení. V tomto případě je účinnost nasávání (aspirační) rovna 1 (100 %). Přenosové ztráty mohou vznikat gravitačním usazováním uvnitř trysky. Ztráty ve vstupu mohou být také způsobeny turbulencí proudu, ve kterém laterální pohyb částic způsobuje, že dopadají na vnitřní stěnu trysky. Každopádně jde o reprezentativní způsob vzorkování blízky ideálním podmínkám. [19, 20]

Na obrázku č. 12 b) je znázorněn sub-izokinetický odběr vzorku, při kterém limitující proudnice musí z okolního volného proudu divergovat dovnitř trysky. Částice s dostatečnou setrvačností, které leží mimo proudnice nasávaného plynu, mohou překročit limitující proudnice a mohou být také nasáty tryskou. V tomto případě je účinnost odsávání větší nebo rovna 1 pro všechny částice a zvětšuje se od hodnoty 1 až do poměru U_0/U pro dostatečně velké částice. Přenosové ztráty vznikají z gravitačního usazování

v trysce, z účinků turbulence ve volném proudu a z nárazů částic do vnitřní stěny trysky způsobených expanzí proudnic. [19, 20, 21]

Obrázek č. 12 c) zobrazuje super-izokinetické vzorkování, ve kterém nasávaný proud naopak konverguje z okolního volného proudu do trysky. Částice s dostatečnou setrvačností, které leží v rámci nasávaných proudnic, mohou překročit limitující proudnice a nemusí tedy být nasáty tryskou. Účinnost odsávání je menší nebo rovna 1 pro všechny částice a zmenšuje se od hodnoty 1 do poměru U_0/U pro větší částice. Přenosové ztráty vznikají z gravitačního usazování v trysce, z účinků turbulence ve volném proudu a z turbulentního ukládání částic v tzv. oblasti *vena contracta* vytvořené při super-izokinetickém vzorkování. [19, 20, 22]

Dílčí účinnosti odběru vzorku jsou v literatuře definovány pro určité nastavitelné podmínky vzorkování. Mají tedy několik platných vyjádření.

Izoaxiální izokinetické vzorkování je ideální vzorkovací konfigurace, při které jsou nasávány všechny velikosti částic s téměř 100% účinností. Odchylka od této ideální konfigurace do oblasti anizokinetického a anizoaxiálního odběru vzorků vede k nereprezentativnímu odběru. Aspirační účinnost pro všechny částice se tedy liší od hodnoty 100 % a s rostoucí velikostí částic se rozdíl dále zvětšuje. Přenosové ztráty v izokinetickém, izoaxiálním odběru vzorků vznikají hlavně v důsledku gravitačního usazování v případě horizontálního toku vzdušiny a účinků turbulence proudu. Pokud průtok vzdušiny směřuje svisle nahoru nebo dolů, budou ztráty z usazování zanedbatelné, pokud bude samozřejmě rychlost vzorkování ve srovnání s rychlostí usazování částic velká. Jestliže tok není izokinetický ani izoaxiální, pak mohou nastat ztráty na vstupu do trysky setrvačností částic, které opustí limitující proudnice a nejsou tím pádem nasáty, a usazením větších částic, které nenásledují trajektorie proudnic, na vnitřní stěně trysky. Velmi důležitým parametrem pro výpočet účinností je tzv. Stokesovo číslo. Je definováno jako poměr brzdné dráhy částice a jistého charakteristického rozměru, v tomto případě průměru odběrové hubice. Tzv. brzdna dráha je vzdálenost, na které se částice přizpůsobí náhlé změně rychlosti okolní nosné vzdušiny. Větší částice mají díky své větší hmotnosti větší hybnost a jejich brzdna dráha je obecně větší. Brzdnou dráhu lze vyjádřit součinem tzv. doby relaxace částic a rychlosti proudění. [17]

Definované vyjádření Stokesova čísla je uvedeno v rovnici č. 5 a relaxační doby v kapitole 5.4 v teoretickém výpočtu vzorkování. Předpokladem pro teoretické výpočty v kapitole 5.4 je konstantní rychlost okolního proudu plynu a rychlost vzorkovaného plynu po celou dobu odběru. Je také dodržena podmínka zachování dostatečně velké rychlosti oproti rychlosti usazování částic.

Pro izoaxiální vzorkování, kde je důležitá rychlost proudění okolního plynu U_0 a vzorkovací rychlost U , uvedli Belyaev a Levin korelaci pro účinnost odsávání η_{asp} .

Účinnost aspirace se zněním dle rovnice č. 4 v závislosti na Stokesově čísle je vykreslena na obrázku č. 13 pro různé poměry rychlostí. [17]

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] \cdot \left[1 - \left(1 + Stk \cdot \left(2 + 0,617 \cdot \left[\frac{U_0}{U} \right]^{-1} \right) \right)^{-1} \right] [-] \quad (4) \quad [23]$$

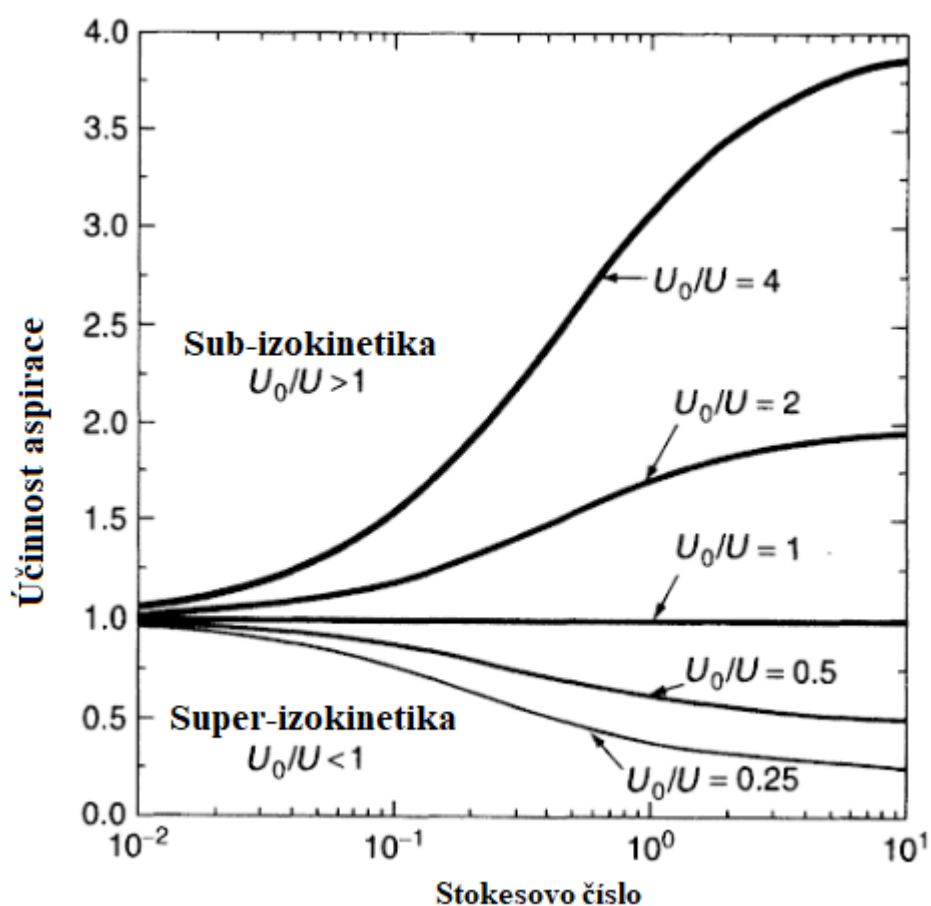
- Stk - Stokesovo číslo [-]
- U - rychlost proudění v ústí hubice [m.s⁻¹]
- U_0 - rychlost proudění okolního plynu [m.s⁻¹]

Rovnice platí pro $0,18 \leq Stk \leq 2,03$ a $0,17 \leq U_0/U \leq 5,6$.

Stokesovo číslo se vypočítá podle rovnice č. 5.

$$Stk = \frac{s}{d} = \frac{\tau \cdot U_0}{d} \quad [-] \quad (5) \quad [17]$$

- s - brzdná dráha částice [m]
- τ - doba relaxace částice [s]
- U_0 - rychlost proudění okolní vzdušiny [m.s⁻¹]
- d - průměr vstupního průřezu trysky [m]



Obrázek 13 Účinnost aspirace při izoaxiálním odběru [17]

Ve studii Rader a Marple je uvedena korelace pro izoaxiální aspirační účinnost, která zahrnuje vliv zachycování částic vstupní hranou trysky. [25]

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] \cdot [1 - (1 + 3,77 \cdot Stk^{0,883})^{-1}] \quad [-] \quad (6) \quad [25]$$

Rovnice platí pro $0,005 \leq Stk \leq 10$ a $0,2 \leq U_0/U \leq 5$.

V pracích Liu *et. al.* a Zhang a Liu byly odvozeny korelace pro účinnost izoaxiálního odsávání na základě numerických dat. [17]

$$\eta_{asp} = 1 + \frac{\left[\frac{U_0}{U} - 1 \right]}{\left[1 + \frac{0,418}{Stk} \right]} \quad [-] \quad (7) \quad [21]$$

Rovnice platí pro $U_0/U > 1$.

$$\eta_{asp} = 1 + \frac{\left[\frac{U_0}{U} - 1 \right]}{\left[1 + \frac{0,506 \cdot \sqrt{U_0/U}}{Stk} \right]} \quad [-] \quad (8) \quad [26]$$

Rovnice platí pro $U_0/U < 1$ a pro $0,01 \leq Stk \leq 100$ a $0,1 \leq U_0/U \leq 10$.

Tyto korelace jsou velmi blízké korelaci ze studie Belyaev a Levin a mohou být použity zaměnitelně. [17]

Částice jsou na vstupu do trysky ukládány gravitačním usazováním a setrvačnými účinky. Ztráty částic v trysce jsou zahrnuty v tzv. transportní účinnosti.

Ve studii Okazaki, Wiener a Willeke je předpokládáno, že částice, která pronikne do mezní vrstvy vytvořené v oblasti vstupu (viz obrázek č. 12), se uloží gravitačním usazováním na vnitřní stěně vstupu při horizontálním izoaxiálním vzorkování. Tloušťka mezní vrstvy je charakterizována Reynoldsovým číslem proudu na vstupu do hubice. Frakce částic, které pronikají do mezní vrstvy, je charakterizována Stokesovým číslem založeným na rychlosti okolní vzdušiny (viz rovnici č. 5). Gravitační depozice v mezní vrstvě vstupu je charakterizována gravitačním depozičním parametrem Z (viz rovnici č. 9). [19, 27, 28]

$$Z = \frac{L}{d} \cdot \frac{U_{ts}}{U} \quad [-] \quad (9) \quad [19, 27]$$

- U_{ts} - usazovací rychlost částice [m.s⁻¹]
- d - průměr vstupního průřezu [m]
- L - délka vstupní oblasti hubice [m]

Parametr gravitační depozice Z je poměr vzdálenosti usazování částic během transportu ve vstupní oblasti. V experimentech Okazaki *et. al.* byla provedena měření depozice uvnitř hubice pro různé velikosti částic, poměry rychlostí a průměry trysek. Předpokládají, že depozice uvnitř vstupu je dána kombinací Z , Re a Stk , neboli konstantou K (viz rovnici č. 11). Výsledky jsou korelovány jako efektivita gravitačního usazování $\eta_{trans,grav}$ (viz rovnici č. 10) pro horizontální izoaxiální vzorkování. [19, 27]

$$\eta_{trans,grav} = \exp[-4,7 \cdot K^{0,75}] \quad [-] \quad (10) \quad [19, 27]$$

$$K = Z^{1/2} \cdot Stk^{1/2} \cdot Re^{-1/4} \quad [-] \quad (11) \quad [19, 27]$$

- Re - Reynoldsovo číslo [-]

Vstupní průměry hubic se při pokusech pohybovaly v rozmezí od 0,32 do 1,59 cm, avšak délka vstupu byla rovna 20 cm pro všechna měření. V práci Yamano a Brockmann je poukázáno na to, že analýza byla provedena pro laminární mezní vrstvu ve vstupní hubici a že nemusí být platná, jakmile se v ní rozvine turbulentní proudění. Pokud proudění zůstává laminární, ukládání již nemusí být způsobeno účinkem vstupu, ale spíše účinkem proudění v trubce. Konstantní délka odběrové trubice použitá v datech může tyto efekty zakrýt. [29]

V případě, kdy je $\omega < 1$ (podsávání), jsou některé částice s rychlostními vektory směřovanými ke stěnám trysek usazeny a účinnost přenosu je menší než 1. V práci Liu *et al.* byla popsána setrvačná účinnost přenosu $\eta_{trans,inert}$ pro sub-izokinetické izoaxiální vzorkování (viz rovnici č. 12). Studie Hangal a Willeke naopak nepředpokládá výskyt ztrát setrvačností pro sub-izokinetické izoaxiální vzorkování. [21,22]

$$\eta_{trans,inert} = \frac{1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] / \left[1 + \frac{2,66}{Stk^{2/3}} \right]}{1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] / \left[1 + \frac{0,418}{Stk} \right]} \quad [-] \quad (12) \quad [21]$$

Rovnice platí pro $0,01 \leq Stk \leq 100$ a $1 \leq U_0/U \leq 10$.

Studie Liu *et al.* tvrdí, že pro $\omega > 1$ (super-izokinetické vzorkování) nejsou vektory rychlostí částic směřovány ke stěnám a žádné částice tedy nejsou ukládány. Setrvačnou účinnost přenosu pro super-izokinetické vzorkování uvedli rovnu 1 ($\eta_{trans,inert} = 1,0$) pro podmínky $0,01 \leq Stk \leq 100$ a $0,01 \leq U_0/U \leq 1,0$. Hangal a Willeke však zastali tvrzení, že v super-izokinetickém odběru vzorku je na vstupu trysky vytvořena oblast zúženého proudu, tzv. *vena contracta*, a že v ní budou turbulencí ukládány částice. Setrvačnou transportní účinnost popsali rovnicí č. 13 a parametr setrvačných ztrát I_v rovnicí č. 14. [17, 22]

$$\eta_{trans,inert} = \exp[-75 \cdot I_v^2] \quad [-] \quad (13) \quad [22]$$

$$I_v = 0,09 \cdot \left[Stk \cdot \frac{U - U_0}{U_0} \right]^{0,3} \quad [-] \quad (14) \quad [22]$$

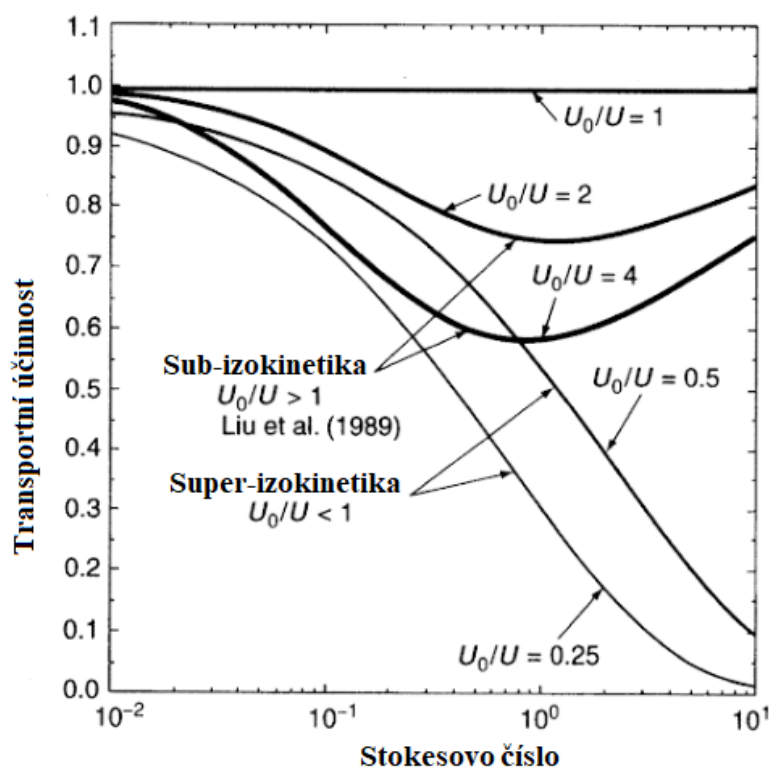
Rovnice platí pro $0,02 \leq Stk \leq 4$ a $0,25 \leq U_0/U \leq 1,0$, kde I_v je parametr popisující setrvačné ztráty ve *vena contracta*.

Obrázek č. 14 zobrazuje účinnost přenosu částic jako funkci Stokesova čísla podle výpočtů korelace z výzkumu Liu *et al.* pro sub-izokinetické vzorkování a korelace z práce Hangal a Willeke pro super-izokinetické vzorkování. V tomto diagramu nejsou zahrnuty gravitační ztráty. Při jakémkoliv neizokinetickém odběru účinnost přenosu vždy klesá.

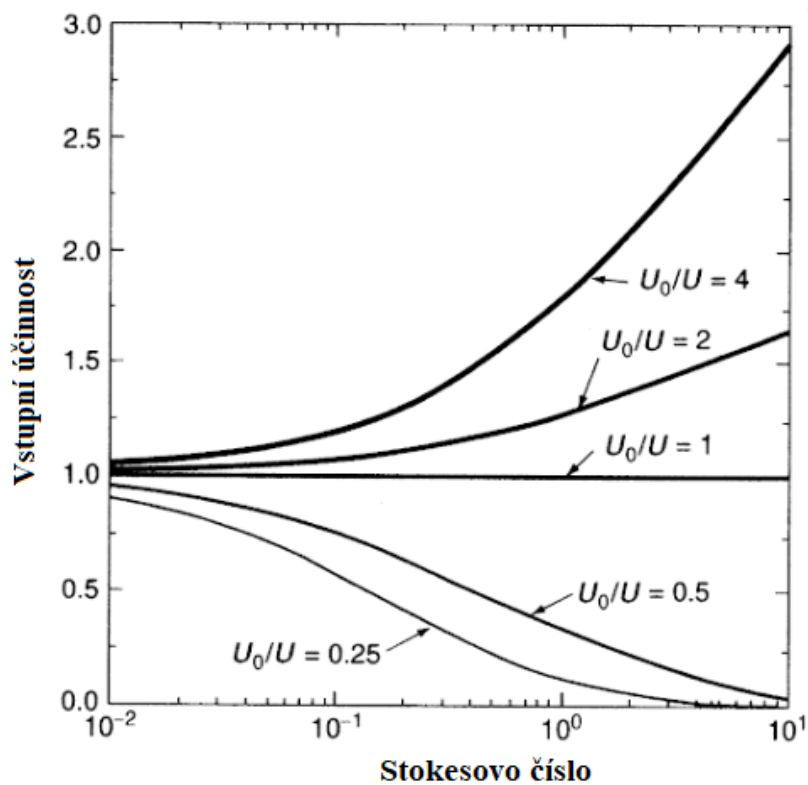
Účinnost vstupu pro izoaxiální vzorkování je výsledkem součinu účinnosti odsávání (aspirace) a všech použitelných účinností přenosu (transportu). Obrázek č. 15 znázorňuje celkovou účinnost vstupu jako funkci Stokesova čísla. Účinnosti jsou vypočteny podle studie Belyaev a Levin pro účinnost odsávání, účinnost přenosu podle Liu *et al.* pro sub-izokinetické vzorkování a účinnost přenosu podle Hangal a Willeke pro su-

per-izokinetické vzorkování. Opět zde nejsou zahrnuty gravitační ztráty. Zde je viditelný minimální vliv transportní účinnosti při podsávání ($U_0/U > 1$) na celkovou účinnost vstupu, která je dána součinem všech tří druhů účinností (viz rovnici č. 15). [17]

$$\eta_{vstup} = \eta_{asp} \cdot \eta_{trans,grav} \cdot \eta_{trans,inert} \quad [-] \quad (15) \quad [17]$$

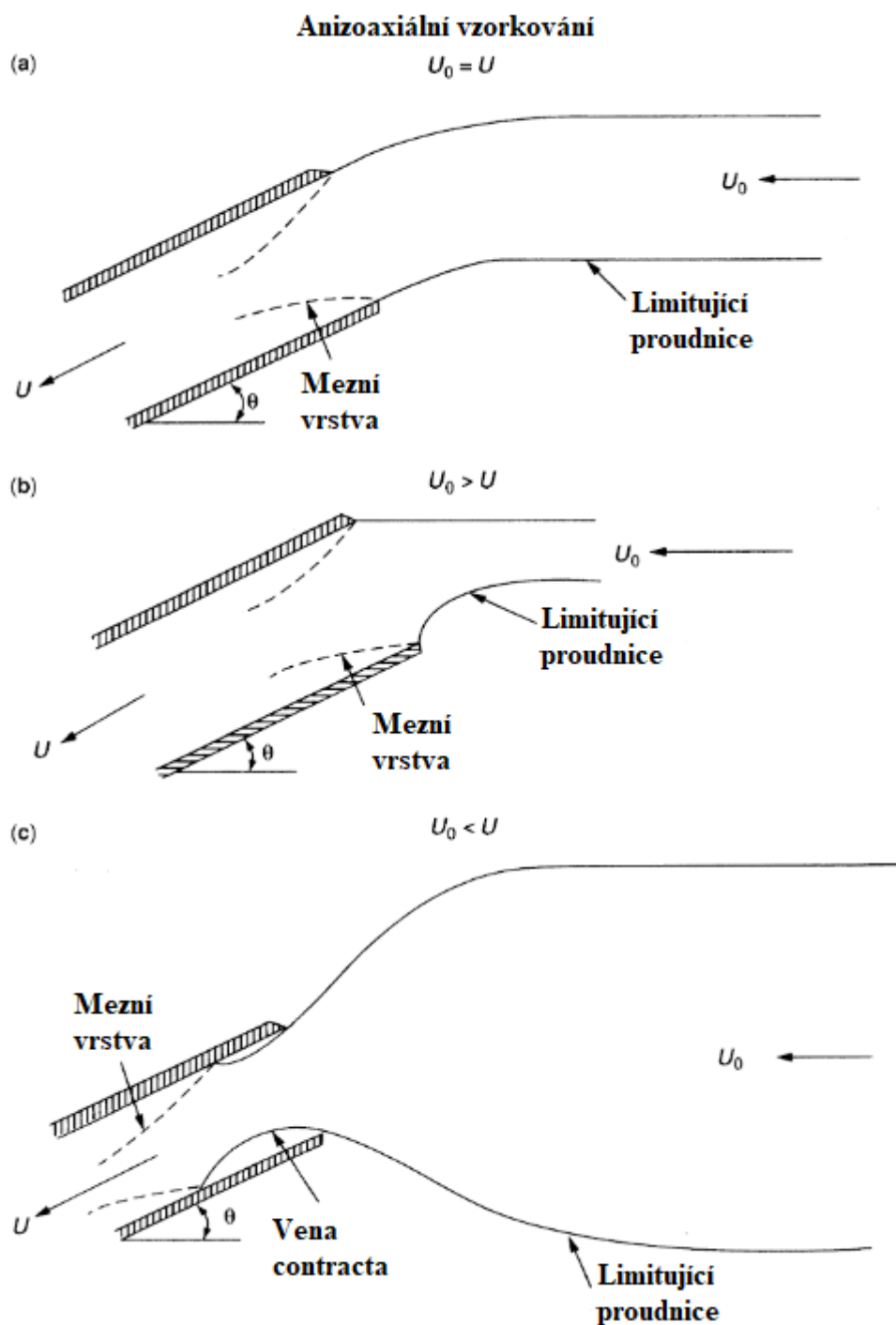


Obrázek 14 Transmisní účinnost při izoaxiálním odběru



Obrázek 15 Vstupní účinnost při izoaxiálním odběru

3.3.2. Anizoaxiální vzorkování



Obrázek 16 Schéma anizoaxiálních režimů vzorkování vzdušiny [17]

Na obrázku č. 16 je schematický diagram anizoaxiálního vzorkování pro průtokové podmínky $U_0 = U$, $U_0 > U$ a $U_0 < U$. Úhel θ je úhel mezi směrem rychlosti okolního proudu vzdušiny a směrem rychlosti odebíraného vzorku v trysce. Částice s dostatečnou setrvačností pro přechod přes limitující proudnice dovnitř nebo vně nasávaný proud budou vzorkovány s účinností odlišnou od hodnoty 1. Transportní ztráty vznikají z gravitačního usazování na vstupu hubice, z turbulencí v okolním proudu a ze ztrát ve

vena contracta. Další ztráta přenosu vzniká v důsledku nárazu částic do hrany vstupního průřezu trysky. [22]

Hangal a Willeke ve své studii zkoumali literaturu o anizoaxiálním odběru vzorků a provedli množství experimentů. Dospěli k výrazům funkcí s jistým rozsahem použitelnosti pro anizoaxiální vzorkování. Depozice částic ve vstupu trysky nastává z gravitačního usazování a z depozice ve *vena contracta*, jak je popsáno v kapitole 3.1.1. Anizoaxiální vzorkování má však další depoziční mechanismus popsáný jako přímý náraz do stěny. Částice s dostatečnou setrvačností opouští nasávané stočené proudnice a naráží do vnitřní stěny trysky. Jde o jev podobný depozici ve *vena contracta*. [22, 30]

Anizoaxiální data ve studii Hangal a Willeke byla naměřena v horizontálním proudu vzdušiny, přičemž tryska byla nakloněna směrem nahoru nebo dolů vzhledem k vodorovné ose. Dle jejich konvence tryska směřující dolů má záporný úhel vzhledem k horizontále a průtok vzorku je stočen směrem nahoru; tento případ je označován jako vzestupné vzorkování. Podobně je tomu při natočení trysky směrem nahoru, kdy jde naopak o sestupné vzorkování. Velikost úhlu vzorkování je vyjádřena ve stupních. Jediná korelace, ve které je rozlišováno vzestupné a sestupné vzorkování, je pro ztráty odrazem částic od vstupní hrany trysky. [22, 30]

Dle závěrů Hangal a Willeke korelace pro účinnost aspirace (viz rovnici č. 16) určená studií Durham a Lundgren odpovídá jejich naměřeným datům pro úhly vzorkování od 0° do 60°. V účinnosti figuruje tzv. modifikované Stokesovo číslo (rovnice č. 17). [22]

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{U_0}{U} \cdot \cos\theta - 1 \right] \cdot \frac{1 - \left[1 + \left[2 + 0,617 \cdot \left(\frac{U_0}{U} \right) \right] Stk' \right]^{-1}}{1 - [1 + 2,617 \cdot Stk']^{-1}} \cdot \left[1 - [1 + 0,55 \cdot Stk' \cdot e^{0,25Stk'}]^{-1} \right] \quad (16) \quad [31]$$

$$Stk' = Stk \cdot e^{0,022 \cdot \theta} \quad (17) \quad [31]$$

- θ - úhel sklonu trysky od osy proudu vzdušiny [-]
- Stk' - modifikované Stokesovo číslo [-]

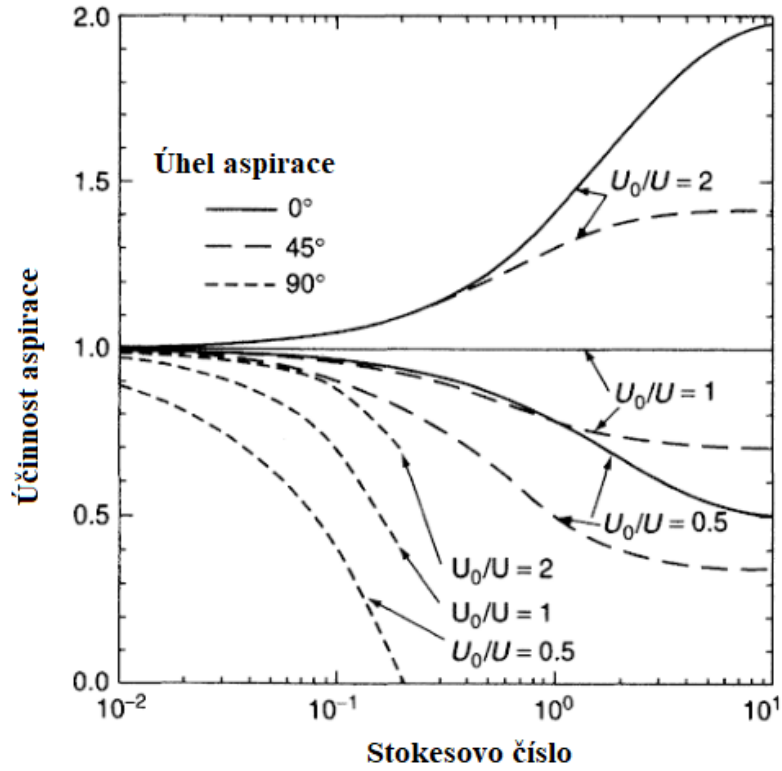
Rovnice platí pro $0,02 \leq Stk \leq 4$ a $0,5 \leq U_0/U \leq 2$ a $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$.

Rozšířili také výraz od Laktionova, která byla původně vytvořena pro vzorkování pouze při natočení o 90°, na verzi pro úhly mezi 45° a 90°. [17]

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{U_0}{U} \cdot \cos\theta - 1 \right] \cdot \left[3 \cdot Stk \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right] \quad (18) \quad [22]$$

Rovnice platí pro $0,02 \leq Stk \leq 0,2$ a $0,5 \leq U_0/U \leq 2$ a $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

Účinnost aspirace jako funkce Stokesova čísla pro vzorkování při 0°, 45° a 90° pro daný rozsah U_0/U je znázorněna na obrázku č. 17. Pro výpočty pro úhly 0° a 45° byla použita rovnice č. 16 a pro úhel vzorkování 90° rovnice č. 18. Pro anizoaxiální odběr lze pozorovat prudký odklon od reprezentativního vzorkování, které představuje vodorovná přímka s účinností aspirace 1.



Obrázek 17 Účinnost aspirace při anizoaxiálním odběru

Ve výzkumu Hangal a Willeke byl modifikován výraz ze studie Okazaki, Wiener a Willeke pro gravitační usazování na vstupu trysky, aby se zohlednil sklon trysky. Výpočet účinnosti přenosu pro gravitační usazování $\eta_{trans,grav}$ je uveden v rovnici č. 19. [22, 19]

$$\eta_{trans,grav} = e^{-4,7 \cdot K_{\theta}^{0,75}} \quad (19) \quad [22]$$

$$K_{\theta} = Z^{1/2} \cdot Stk^{1/2} \cdot Re^{-1/4} \cdot \cos\theta = K \cdot \cos\theta \quad (20) \quad [22]$$

Je zřejmé, že pro horizontální vzorkování s rychlostí proudu v horizontálním směru ($\theta = 0^\circ$) je K_{θ} identické s K a rovnice č. 20 je redukována na rovnici č. 11. Pro vertikální vzorkování ($\theta = 90^\circ$) je $K_{\theta} = 0$ a neexistují žádné gravitační ztráty. Účinnost přenosu při gravitačním usazování závisí pouze na orientaci směru odběru vzorku vzhledem ke gravitační síle a nikoliv na izoaxiálním nebo neizoaxiálním vzorkování.

Studie Hangal a Willeke uvádí účinnost přenosu pro setrvačnost částic, která zahrnuje ztráty ve *vena contracta* započítávané parametrem I_v , a ztráty z přímého nárazu na vnitřní stěnu trysky započítávané parametrem I_w . Tyto ztráty jsou kombinovány v korelaci pro účinnost setrvačného přenosu v rovnici č. 21. [22]

$$\eta_{trans,inert} = e^{-75 \cdot (I_v + I_w)^2} \quad (21) \quad [22]$$

Rovnice platí pro $0,02 \leq Stk \leq 4$ a $0,25 \leq U_0/U \leq 4$.

Ztrátový parametr vena contracta je definován podle rovnice č. 22.

$$I_v = 0,09 \cdot \left[Stk \cdot \cos\theta \cdot \frac{U - U_0}{U_0} \right]^{0,3} \quad (22) \quad [22]$$

Rovnice platí pro $0,02 \leq Stk \leq 1,0$. V ostatních případech je $I_v = 0$.

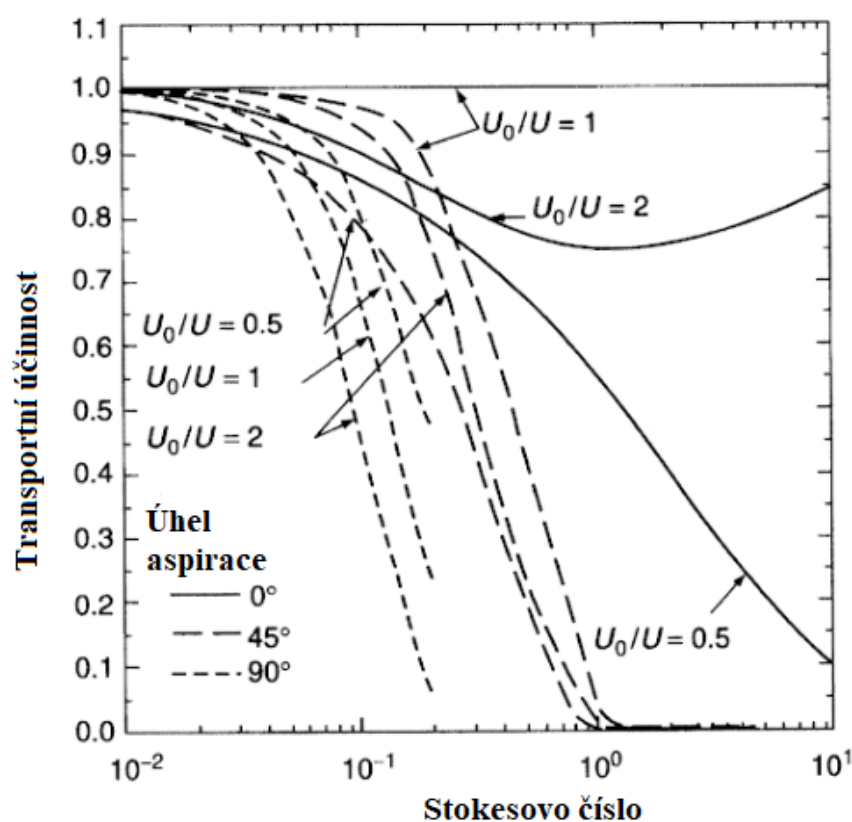
Ztráty z přímého nárazu jsou jediné ztráty, které silně závisí na tom, zda tryska směřuje svisle nahoru nebo dolů při horizontálním proudu vzdušiny. Při sestupném vzorkování (směrem dolů) směřuje tryska směrem nahoru od horizontály a gravitační usazování působí na pohyb částic pryč od stěny, čímž se snižují nárazy na stěnu. Toto je zohledněno v korelaci odečtením úhlu α (viz rovnici č. 25) od úhlu vzorkování θ . Při vzestupném vzorkování, tryska směřuje dolů a gravitační usazování působí na pohyb částic směrem ke stěně, což ztráty nárazem zvyšuje. V tomto případě se úhel α přičítá k úhlu vzorkování θ , který se vždy dosazuje v kladných hodnotách. Parametr ztráty nárazem I_w je definován v rovnici č. 23 pro sestupné vzorkování a v rovnici č. 24 pro vzestupné vzorkování. [17]

$$I_w = Stk \cdot \sqrt{\frac{U_0}{U}} \cdot \sin(\theta - \alpha) \cdot \sin\left(\frac{\theta - \alpha}{2}\right) \quad (23) \quad [22]$$

$$I_w = Stk \cdot \sqrt{\frac{U_0}{U}} \cdot \sin(\theta + \alpha) \cdot \sin\left(\frac{\theta + \alpha}{2}\right) \quad (24) \quad [22]$$

$$\alpha = 12 \cdot \left[\left(1 - \frac{\theta}{90}\right) - e^{-\theta} \right] \quad (25) \quad [22]$$

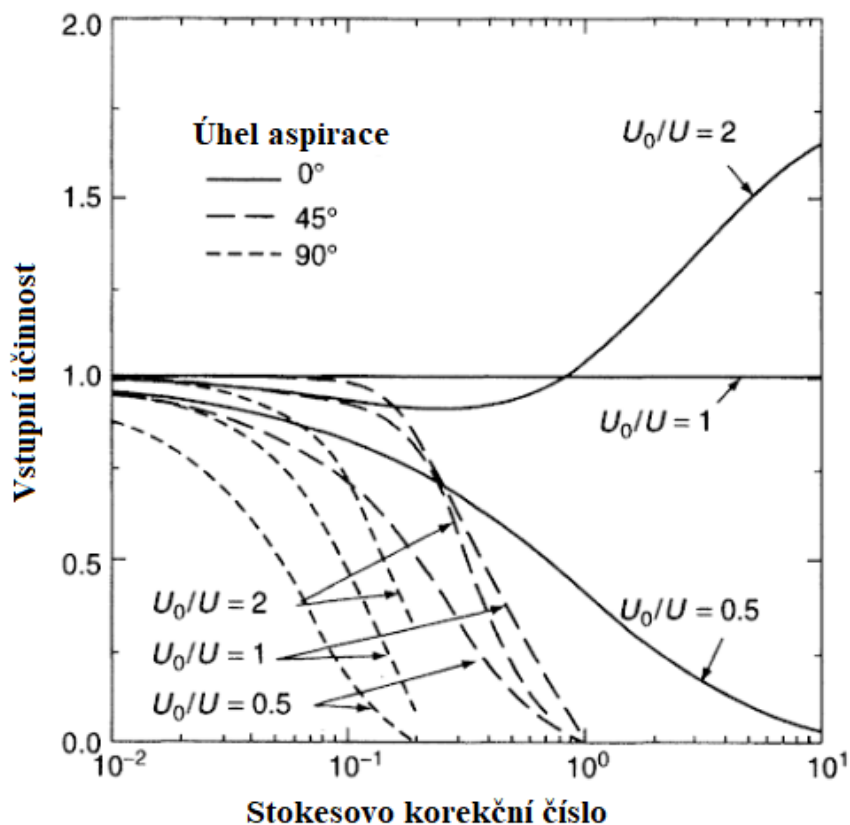
Obrázek č. 17 ukazuje účinnost přenosu pro setrvačné efekty jako funkci Stokesova čísla pro úhly odběru 0° , 45° a 90° při různých hodnotách rychlostního poměru U_0/U . Křivka pro poměr $U_0/U = 2$ při sklonu $\theta = 0^\circ$ je odvozena z výzkumu Liu *et al.*, a zbývající křivky jsou vykresleny z dat z práce Hangal a Willeke. [17]



Obrázek 18 Transmisní účinnost při anizoaxiálním odběru [17]

Celková účinnost vstupu je na obrázku č. 19 vykreslena za stejných podmínek, jako ostatní účinnosti na obrázcích č. 17 a 18. Je zřejmé, že anizoaxiální vzorkování je méně reprezentativní než izoaxiální vzorkování. Celková vstupní účinnost je dána součinem aspirační účinnosti s inerční a gravitační transportní účinností (viz rovnici č. 26). Gravi-
tační depozice v grafu není zahrnuta. [17]

$$\eta_{vstup}' = \eta_{asp} \cdot \eta_{trans,grav} \cdot \eta_{trans,inert} \quad [-] \quad (26) \quad [17]$$



Obrázek 19 Vstupní účinnost při anizoaxiálním odběru [17]

4. Experimentální měření neizokinetických a neizoaxiálních vlivů

Vliv nedodržení izokinetických podmínek na výslednou koncentraci prachu ve vzorku jsem měřil na prašné trati Výzkumného energetického centra VŠB. Testuji hypotézy vycházející z teorie autorů z minulosti (viz kapitolu 3): „Se snižujícím se izokinetickým poměrem odběru se zvyšuje koncentrace pevných částic ve vzorku. Se zvyšujícím se izokinetickým poměrem odběru se snižuje koncentrace pevných částic ve vzorku. Koncentrace pevných částic bude ovlivněna více s rostoucí velikostí částic.“ „Při natočení odběrové hubice vůči směru proudu vzdušiny bude docházet s rostoucím Stokesovým číslem k poklesu měřené koncentrace pevných částic. Koncentrace pevných částic bude ovlivněna více s rostoucí velikostí částic.“ Tyto vlivy testuji na velmi důležité běžně měřené skupiny pevných částic o velikosti od 1 μm do 10 μm .

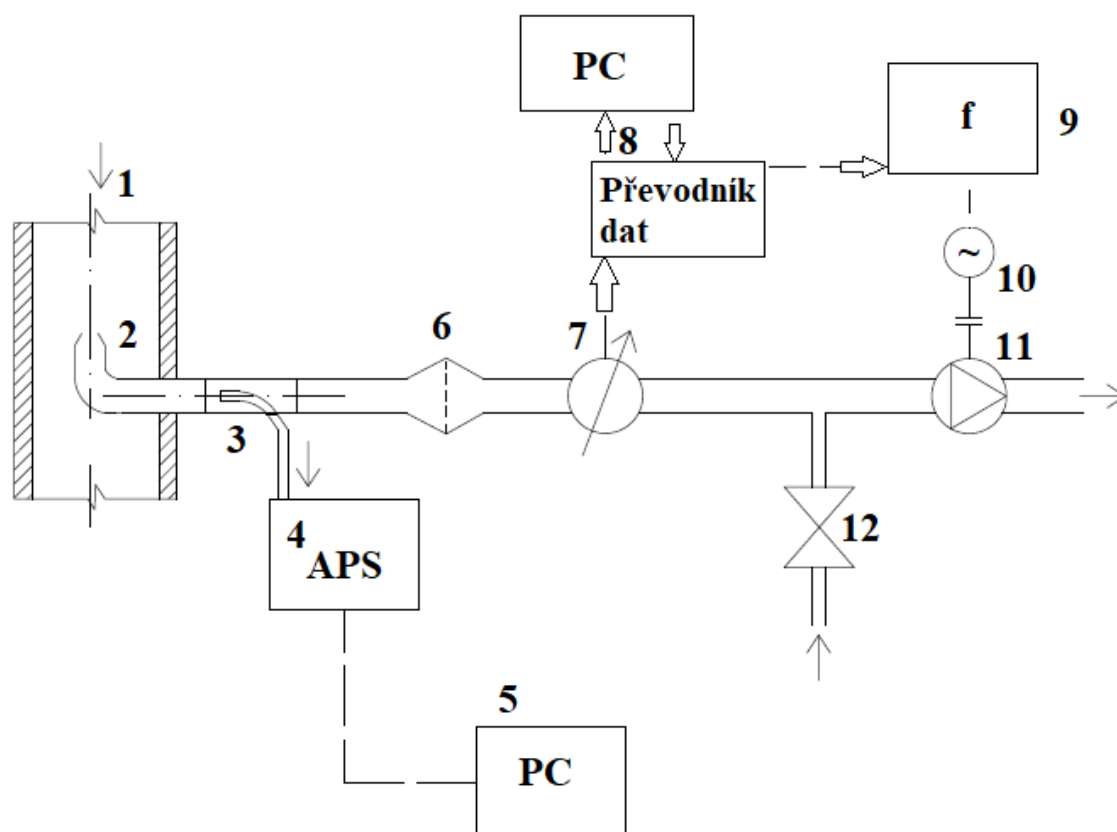
4.1. Použitá zařízení

K měření koncentrace jemných pevných částic slouží prašná trať, která je pevně seřazena v provozu Výzkumného energetického centra. Skládá se primárně z vertikálního úseku potrubí se sacím košem na jeho vrcholu. Potrubí je připojeno k radiálnímu ventilátoru, který nasává vzduch z haly zkušebny a vyfukuje ho do venkovního prostředí. Před ventilátorem je zapojena Venturiho trubice sloužící k měření průtoku vzduchu a také filtrační zařízení oddělující pevné částice ze vzduchu. Okamžitý průtok vzduchu je z průtokoměru společně s teplotou zpracováván pomocí počítačového softwaru, který zároveň slouží k ovládání frekvenčního měniče elektromotoru ventilátoru, potažmo k regulaci průtoku vzduchu prašnou tratí. Zapojení celé prašné tratě včetně okolních zařízení je uvedeno v kapitole 4.2.

V prvním patře tratě je umístěn jeden ze dvou měřících profilů s celkem dvěma přírubami pro zapojení odběrových hubic či jiných měřidel. Druhý měřící profil v přízemí haly k měření není použit. Oba měřící profily splňují podmínku délky rovinného úseku potrubí pro umístění měřící roviny (viz kapitolu 2.2).

4.1.1. Měřící aparatura

Měření je prováděno v prvním patře prašné tratě. K samotnému odběru slouží přenosná odběrová aparatura. Na obrázku č. 20 je blokové schéma připojení odběrové aparatury k prašné trati. Jednoduché šipky znázorňují proudění vzdušiny, plné šipky průchod signálů.

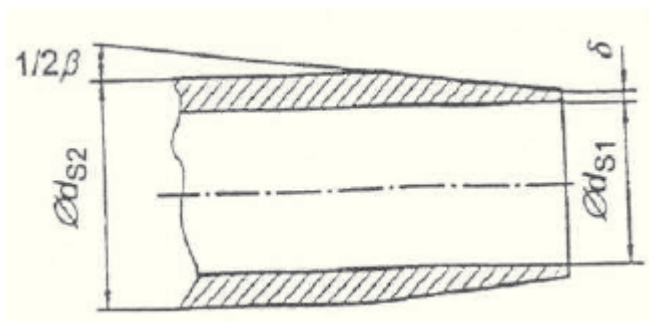


Obrázek 20 Schéma připojení měřící aparatury [Autor]

Do osy vertikálního potrubí (1) je v měřícím profilu zapuštěna odběrová hubice (2). Nasává vzorek vzduchu protékajícího potrubím do měřící tratě. Do tratě je zavedena další odběrová hubice v rozdělovači vzorku (3), kterou je nasávána část vzorku do přístroje APS (4) – aerodynamického detektoru pevných částic. Naměřená data jsou zobrazována v počítači (5) pomocí softwaru. Dále je v odběrové trati zařazen filtr na pevné částice (6) ještě před průtokoměrem (7). Okamžité hodnoty průtoku vzduchu jsou signálem vedeny do počítače (8) plnícího funkci regulátoru otáček elektromotoru vývěvy (10) pomocí frekvenčního měniče (9). Software v počítači porovnává aktuální průtok s požadovaným a na základě jejich rozdílu ovládá frekvenční měnič. Vývěva (11) zajišťuje potřebný objemový průtok odběrovou tratí a hubicí (2). Regulační ventil (12) slouží k ulehčení náběhu vývěvy z nulového stavu. Umožňuje nasávání vzduchu přímo do vývěvy z okolí téměř bez tlakových ztrát a náběh není tudíž tolik brzděn. Tento „falešný“ objem vzduchu nijak neovlivňuje průtok přes odběrovou trať.

4.1.2. Odběrová hubice

Tvar a rozměry odběrové hubice jsou dány normou ČSN EN 13284-1. Jsou v ní popsány celkem 3 typy osvědčených normovaných hubic. Pro měření jsou použity hubice se zkoseným vnějším profilem (viz obrázek č. 21).



Obrázek 21 Průřez jednoduché hubice sondy [15]

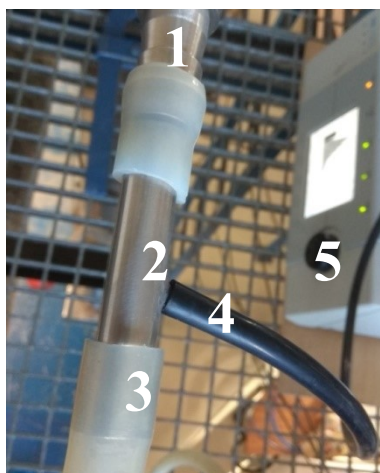
Minimální vnitřní průměr hubice pro měření je normou stanovený na 6 mm. Zkosená část stěny hubice musí být dostatečně široká kvůli zaručení mechanické pevnosti a velikost zkosení β je rovna 20° . Ústí hubice musí mít ostrou hranu a nesmí obsahovat překážky pro průtok média. Hrana vstupního průřezu δ musí mít velikost menší, než 0,05 % velikosti vnitřního průměru hubice d_{s1} . [15]

Hubice je připojena na kovové odběrové potrubí, které je ohnuté do úhlu 90° , aby orientace hubice ve vzorkovací rovině byla rovnoběžná s rychlostí proudění vzdušiny. Odběrové potrubí je zapojeno podle obrázku č. 20 mezi body 2 a 3.

4.1.3. Rozdělovač vzorku

Za kovovým spojovacím potrubím je připojen rozdělovač vzorku se stejným vnitřním průměrem (viz obrázek č. 20 bod 3 a obrázek č. 22 bod 2) pomocí hadicové gumové přípojky. Ten je konstruován z oceli jako potrubí s další 2,9mm odběrovou hubicí umístěnou v ose rozdělovače, kterou je odebírána část vzorku přístrojem APS. V podstatě jde o další odběr vzorku, který je nutné provádět izokineticky. Odběrová hubice vychází z rozdělovače skrz stěnu. Na ni je nasazena gumová hadička, která vede vzorek skrz plastovou redukci na rozměr $\frac{3}{4}$ palce do vstupu přístroje. Průtok vzduchu v ústí malé odběrové hubice je $0,3 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{h}^{-1}$ a je vestavěný v přístroji APS.

- 1 Odběrové potrubí
- 2 Rozdělovač vzorku
- 3 Připojení hadice
- 4 Hadička k APS
- 5 APS



Obrázek 22 Odběr vzorku pro měření [Autor]

4.1.4. Přístroj APS

K měření koncentrace částic v prašné trati je použit přístroj APS (Aerodynamic Particle Sizer). Měří částice o velikosti od 0,5 μm do 20 μm a podle jejich chování při letu a doby letu je zařazuje do celkem 52 předem daných velikostních kategorií. Na výrobu těchto zařízení se specializuje firma TSI. [16]



Obrázek 23 Přístroj APS model 3321 [1]

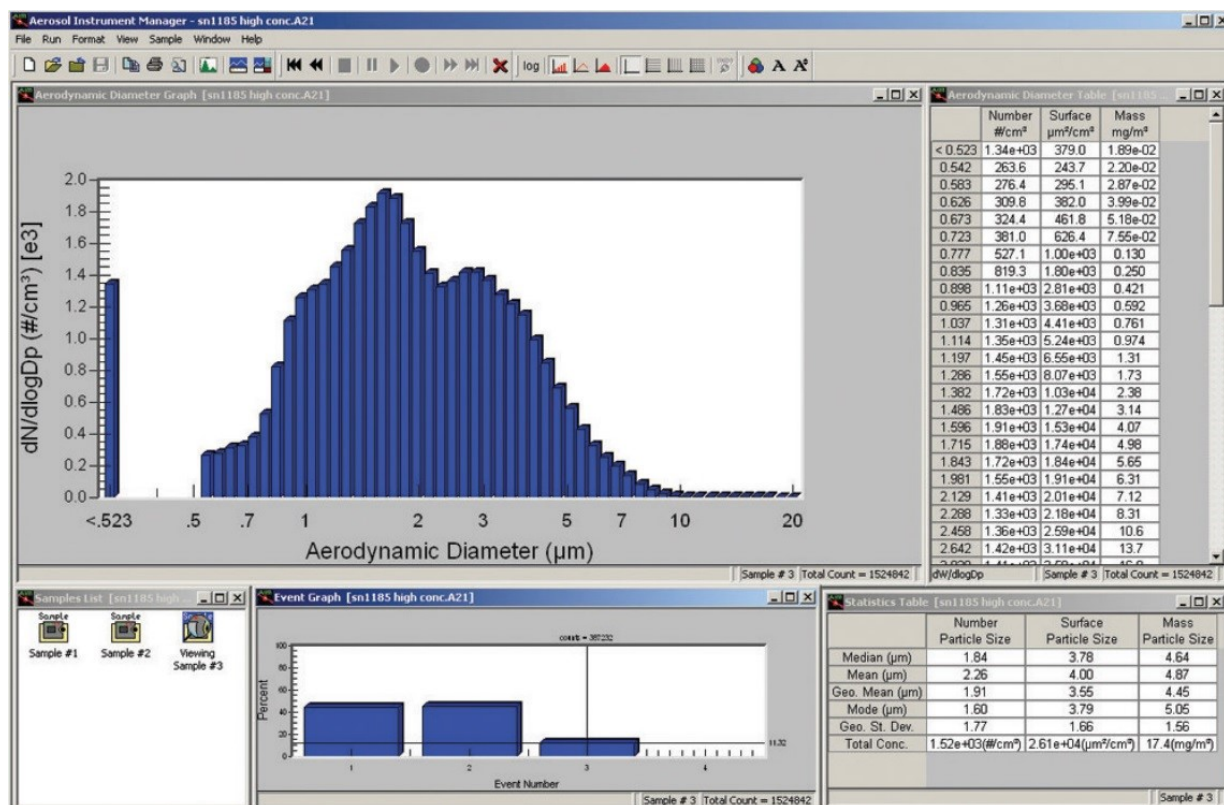
Model spektrometru 3321 dokáže měřit aerodynamický průměr částic a zároveň také intenzitu rozptylu světla na protékajících částicích v rozmezí velikostí 0,52 až 20 μm . Aerodynamický průměr částice je nejdůležitější parametr částic aerosolu, protože rozhoduje o chování částice ve vznosu. Je definován jako průměr kulové částice o hustotě 1000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, která má stejnou ustálenou usazovací rychlost v klidném ovzduší, jako sledovaná částice. [16]

Tento přístroj má využití v oborech toxikologie, dopravě látek, studiích ovzduší, měření prašnosti, detekci nebezpečných látek a dalších. Ke zpracování a zobrazování naměřených dat a také ovládání přístroje slouží speciální program Aerosol Instrument Manager (AIM). [16]

Princip funkce přístroje APS je blíže popsán v kapitole 2.1.3. Na obrázku č. 24 je detailní ukázka vyhodnocovacího softwaru AIM, kde uprostřed je v reálném čase při měření vykreslována distribuční křivka počtu částic v 1 cm^3 podle jejich velikosti a v tabulce vpravo jsou odpovídající číselné hodnoty početní i hmotnostní koncentrace. V tabulce č. 3 jsou uvedeny některé z parametrů přístroje.

Měřitelné aerodynamické průměry částic	0,52 - 20 μm
Maximální počet zpracovaných částic	200 000 s^{-1}
Provozní teplota	10 - 40°C
Jmenovitý objemový průtok	5 $\text{l}_\text{N}\cdot\text{min}^{-1}$

Tabulka 3 Parametry spektrometru APS 3321 [16]



Obrázek 24 Ukázka softwaru Aerosol Instrument Manager [16]

4.1.5. Další zařízení

Dílčí proud vzorku je za rozdělovačem vzorku veden skrze hadici do tělesa filtru. Filtr slouží k záchytu pevných částic ze vzorku s účinností záchytu větší než 99,5 % pro částice o velikosti 0,3 μm a větší. Skládá se z ochranného pouzdra, ve kterém je uloženo sítko jako nosič filtru a na něm plochý filtrační materiál. Na pouzdro je ukládáno víko zajišťující těsnost pouzdra a pevné uložení filtru. Víko je upevněno tělesem se závitem. Filtr je možné provozovat také v elektricky vytápěném režimu.

Za filtrem je připojen objemový průtokoměr Mass-View 308 firmy Bronkhorst (viz obrázek č. 25) měřící okamžitou hodnotu průtoku přepočítanou na normální podmínky. Data z průtokoměru jsou zpracována převodníkem dat Datalab, který poskytuje signál pro ovládací software v počítači. Software porovnává požadovanou hodnotu průtoku s měřenou hodnotou a ovládá vývěvu. Parametry průtokoměru jsou uvedeny v tabulce (Tabulka č. 4).

Rozsah měřitelných průtoků	50 - 500 $\text{l}_\text{N} \cdot \text{min}^{-1}$
Provozní tlak	do 10 bar-g
Provozní teplota	0 - 50°C

Tabulka 4 Provozní parametry průtokoměru MV-308 [33]



Obrázek 25 Průtokoměr MV-308 [33]

Za průtokoměrem je v sérii připojena vývěva Seco SV 1008 C firmy Busch, která zajišťuje odsávání vzorku vzdušiny skrz celou odběrovou aparaturu. Je poháněna elektromotorem napájeným přes frekvenční měnič. Jednotka Datalab zpracovává signál ze softwaru počítače a ovládá napájení elektromotoru. Parametry vývěvy jsou uvedeny v tabulce č. 5 a její model na obrázku č. 26.

Jmenovitá čerpací rychlost	$7,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Koncový tlak	15 kPa-g
Jmenovitý výkon motoru	0,25 kW
Jmenovité otáčky motoru	3000 min^{-1}

Tabulka 5 Parametry vývěvy Seco SV 1008 C [34]

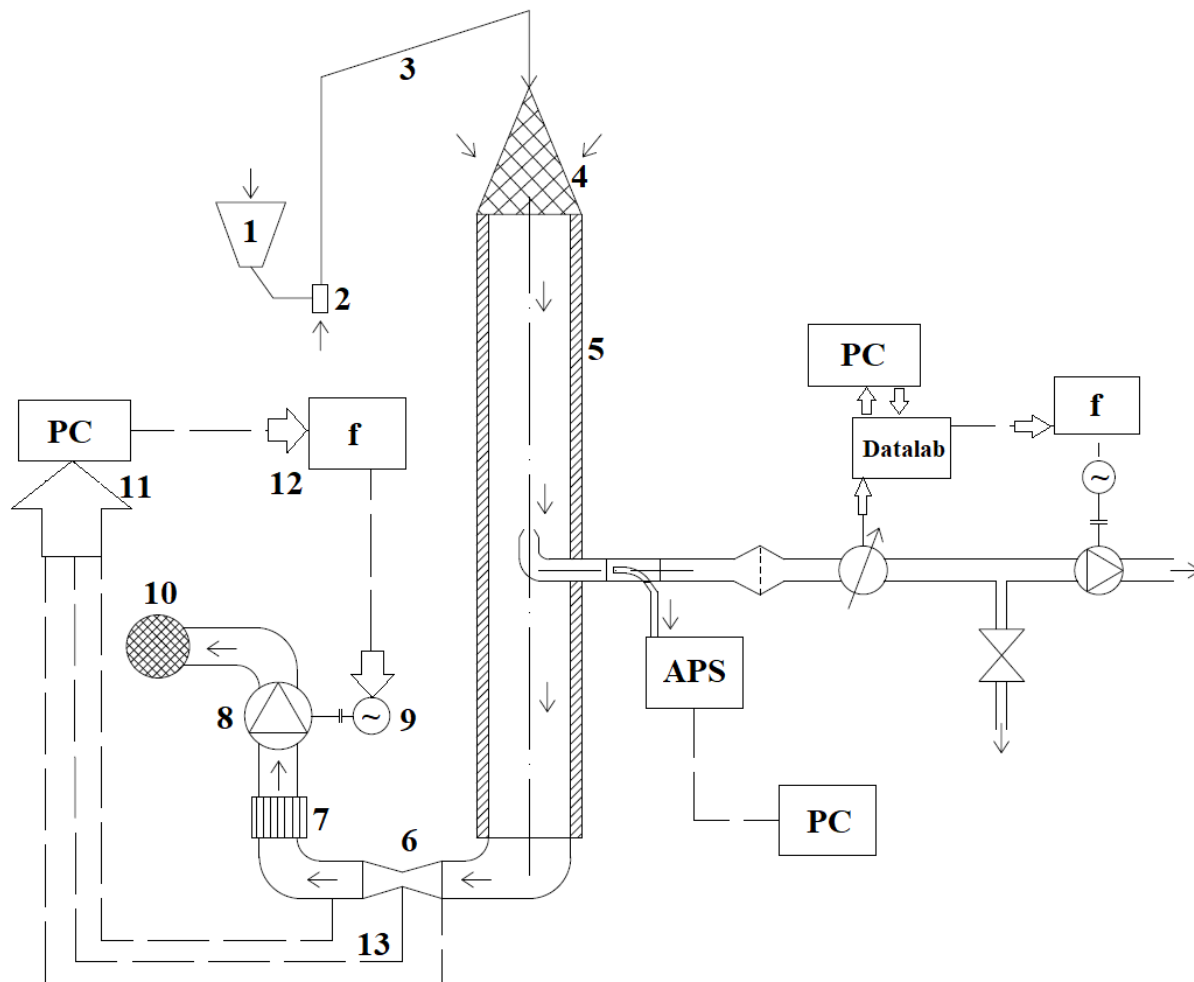


Obrázek 26 Vývěva Seco SV 1008 C [34]

4.2. Sestavení měřicí tratě

Spojením sestavené prašné tratě a měřicí aparatury v měřícím profilu č. 1 (viz obrázek č. 27) vzniká kompletní měřicí trať pro účel měření izokinetiky a izoaxiálnosti.

4.2.1. Zapojení s nepřímým foukáním prášku



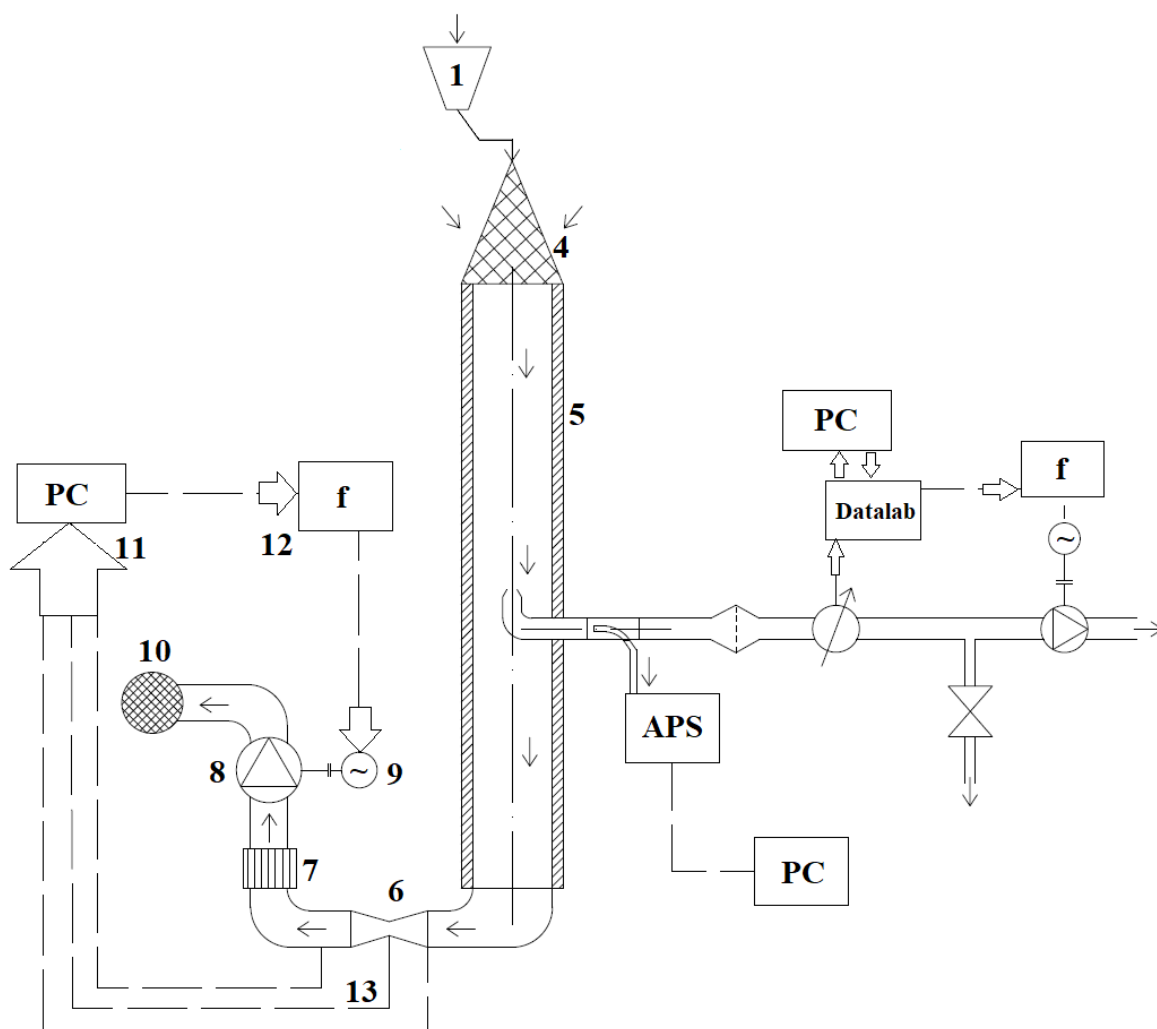
Obrázek 27 Schéma kompletní měřicí tratě [Autor]

Podavač prášku (1) fouká prášek pomocí stlačeného vzduchu přes antistatickou hadičku s vnitřním průměrem 3 mm do ejektoru (2), ve kterém vzduch ze stávajícího rozvodu tlakového vzduchu v hale pracoviště k sobě nasává prachovou směs z podavače. Potrubním spojem (3) je prášek dopravován na vrchol sacího kuželového koše (4), kde je rozprašován směrem svisle dolů a smícháván s nasávaným vzduchem z okolí. Rychlost pohybu prášku se velmi rychle vyrovná s rychlostí průtoku vzduchu. Ve vertikální potrubní trati (5) se prášek rozptýluje po vnitřním průřezu tratě a je unášen konstantní rychlostí směrem svisle dolů. V měřicí rovině je směs prášku a vzduchu z části nasávána odběrovou hubicí a zbylý vzduch pokračuje dále. Ve Venturiho trubici (6) je při průtoku vzduchu měřen diferenční tlak, podle nějž a podle teploty snímané za trubicí je určován objemový průtok přepočítaný na normální podmínky. Data z měřiče (13) jsou signálem posílána do počítače (11). Podle naměřeného průtoku a požadovaného průtoku

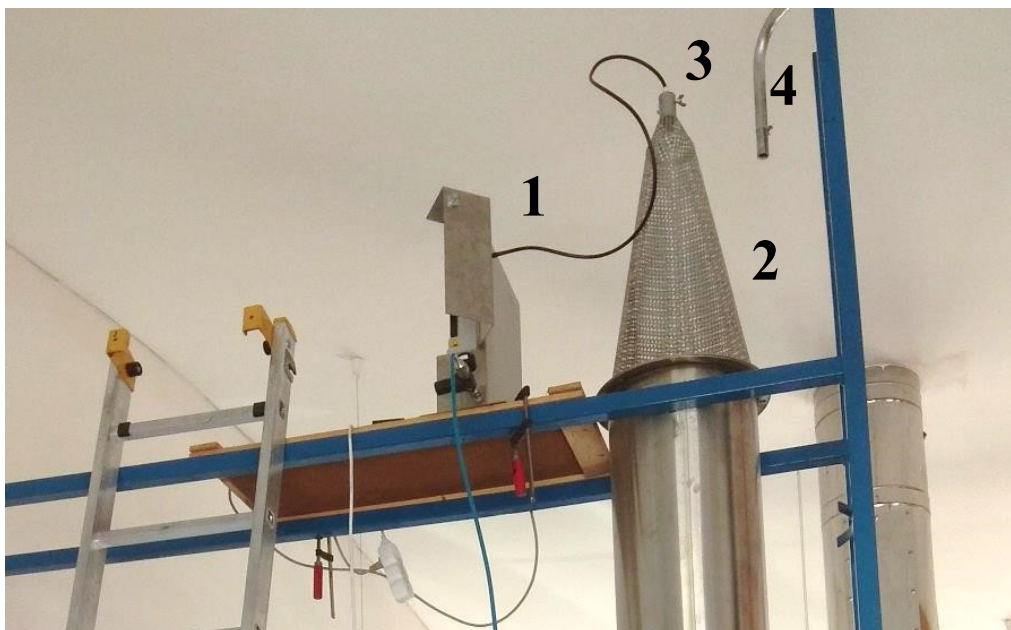
speciální software pro prašnou trať ovládá pohon ventilátoru (9) pomocí frekvenčního měniče (12). Vzduch je před průchodem pracovním prostorem ventilátoru (8) vyčištěn v prachovém filtru (7) a nakonec je vyfukován do venkovního prostředí mimo halu (10).

4.2.2. Zapojení s přímým foukáním prášku

Po úvaze a konzultaci se specialistou na měření aerosolů panem doktorem Hopanem jsem se rozhodl odstranit trubici dopravující prášek do tratě (viz obrázek č. 27 bod 3) a tím pádem i ejektor (bod 2). Důvodem pro toto rozhodnutí bylo uvážení možnosti shlukování částic v proudu nebo naopak rozbíjení částic na menší částice díky působení dopravujícího vzduchu a vznikajícím turbulencím v potrubí, které má celkem dva relativně ostré obraty. Nové zapojení je na obrázku č. 28.

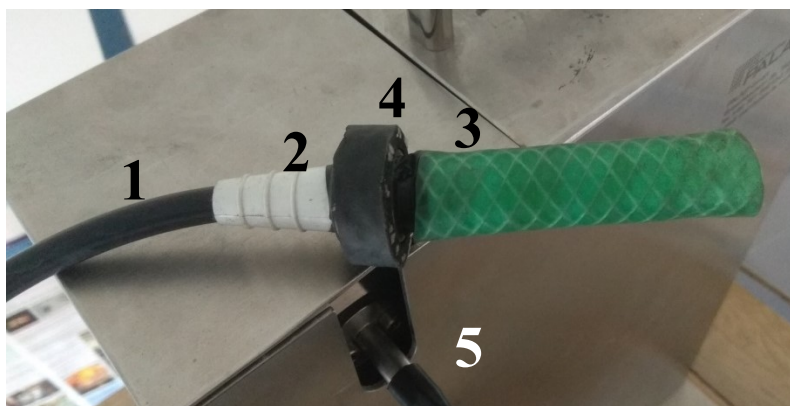


Obrázek 28 Přímé zapojení podavače prášku k trati [Autor]



Obrázek 29 Umístění podavače prášku [Autor]

Podavač prášku jsem umístil na konstrukci, která podepírá vertikální potrubní trať a je upevněna v nejbližší zdi (viz obrázek č. 29). Podavač prášku (1) je tedy umístěn hned vedle sáckého koše (2), do kterého je přímo napojen pomocí stejné antistatické hadičky, jako v původním zapojení (viz kapitolu 4.2.1). Na fotografii je také viditelný odpojený potrubní spoj (4) z původního zapojení. K podavači prášku jsou také nataženy přívody elektrické energie a tlakového vzduchu. Do středu koše (3) je hadička podávající směs prášku a vzduchu upevněna pomocí provizorní redukce (viz obrázek č. 30).



Obrázek 30 Redukce podávání prášku [Autor]

Hadička na výstupu z podavače prášku (5) ústí v redukci (1). Samotná redukce (2) je plastová a má tvar difuzoru. Na jejím konci je nasazen odřezek pevné hadice (3) a na redukci je navlečen gumový kroužek (4) pasující svým průměrem do osy sáckého koše. Upevnění v sacím koši je provedeno pomocí aretačních šroubů tak, aby směr proudění směsi vzduchu a prášku byl stejný s osou potrubní tratě (viz obrázek č. 31).



Obrázek 31 Upevnění výstupu z podavače prášku [Autor]

4.3. Metoda měření

Podavač prášku funguje na základě zdvihu podávacího pístu k rotujícímu kartáči, který rozptyluje materiál do proudu stlačeného vzduchu. Aktuální výška mechanismu je zobrazována na displeji přístroje. Rychlost zdvihu je uváděna v jednotkách mm.h^{-1} .

Při prvním kroku je vložen podávací válec s pístem do přístroje (viz obrázek č. 32) a pomocí mechanismu je úroveň zdvihu nastavena na 60 mm. Tato hodnota odpovídá vzdálenosti mezi plochou podávacího pístu uvnitř válce a vstupní hranou do rotujícího kartáče a je zvolena pro množství prášku podávaného při každém započatém měření. Při nastavení větší úrovně zdvihu by již mohl píst z válce při ruční manipulaci vypadnout.



Obrázek 32 Podavač prášku [Autor]

Po nastavení zdvihu je vyjmut podávací válec s pístem a naplněn práškovým materiálem pouze pomocí sypaní z výšky několika centimetrů, bez jakéhokoliv přechování. Přebytný vzorek nad hranou válce je setřen štětcem (viz obrázky č. 33 a č. 34).



Obrázek 33 Podávací válec [Autor]



Obrázek 34 Podávací válec [Autor]

Podávací válec je umístěn do podavače prášku a je spuštěn zdvih pístu s určitou rychlostí. Byla zvolena hodnota 30 mm.h^{-1} . Rychlost zdvihu je přímo úměrná koncentraci podávaného prášku. Podávání je ponecháno v chodu přibližně 10 minut před začátkem měření, aby byla koncentrace prášku v ustáleném stavu. Svrchní vrstvy prášku mají menší sypnou hustotu. Následně je spuštěn radiální ventilátor a nastaven na požadovaný průtok tratí v jednotkách $\text{m}^3_{\text{N}}.\text{h}^{-1}$. Dále je spuštěn přístroj APS společně s příslušným softwarem Aerosol Instrument Manager. Nakonec je spuštěna také vývěva v měřicí trati a nastavena pomocí softwaru na požadovaný průtok odpovídající izokinetickému odběru.

V programu Aerosol Instrument Manager jsou nastaveny parametry pro měření a sběr dat. Předpokladem je hustota částic 1 g.cm^{-3} . Pro každé měření je zvoleno množství vzorků 40 s dobou vzorkování 10 sekund. Měření probíhá kontinuálně a jsou automaticky ukládána data pro všechny vzorky po dobu celkem 400 sekund. Po skončení měření zůstává podavač prášku, vývěva měřicí tratě i ventilátor prašné tratě stále v provozu. Následně jsou provedeny potřebné změny na odběrové aparatuře, a poté je opět spuštěno měření koncentrace pevných částic. Přístroj APS při měření zaznamenává početní koncentraci částic v 1 cm^3 vzorku, kterou následně pomocí aerodynamického průměru a zadané hustoty částic přepočítává na hmotnostní koncentraci v jednotkách $\mu\text{g.cm}^{-3}$. Při zbylém zdvihu méně než 10 mm v podavači prášku již další měření není zahajováno, ale je připraven zcela nový vzorek prášku. Kvůli konstantnímu průtoku přístrojem APS je nutné zajistit také konstantní průtok vzorku celou odběrovou aparaturou. Neizokinetické odběry tedy nejsou nastaveny změnou objemového průtoku odběrovou tratí, nýbrž záměnou samotných odběrových hubic. Naměřená data jsou po skončení všech měření zpracována.

4.3.1. Izoaxiální měření

Celkové množství hubic k proměření je 18, 9 hubic s tupou vstupní hranou a 9 hubic s ostrou vstupní hranou, s rozměry vstupního průřezu mezi 6 mm a 30 mm. Střední rozměr 15 mm je zvolen jako základní pro izokinetický odběr vzorku.

Kvůli nehomogenitě vrstev podávaného prášku jsou hubice měřeny ve dvojici společně s referenční 15mm hubicí a data jsou vyhodnocována pouze v rámci těchto dvojic. Na obrázku č. 36 je sada hubic a na obrázku č. 35 porovnání tupé a ostré hubice.



Obrázek 35 Ostrá a tupá hubice [Autor]



Obrázek 36 Sada hubic s ostrou hranou, zprava od 6 mm do 30 mm [Autor]

Vnitřní průřezy všech hubic se za vstupním průřezem postupně zužují až do průměru 8 mm (tedy kromě 6mm hubice, která se rozšiřuje), což je vnitřní průměr celé odběrové tratě. V kapitole 4.4 jsou pro rozměr hubice 15 mm, který je v sadě hubic mediánem, vypočítány potřebné parametry nastavení prašné tratě.

4.3.2. Anizoaxiální měření

K měření jsou použity pouze referenční hubice (15 mm tupá a 15 mm ostrá). K přesnému natočení hubice je použit digitální úhloměr s vodováhou. Na odběrovou sondu je drátka připevněn plech ohnutý do pravého úhlu sloužící jako opěrné rovné místo pro úhloměr (viz obrázek č. 38).



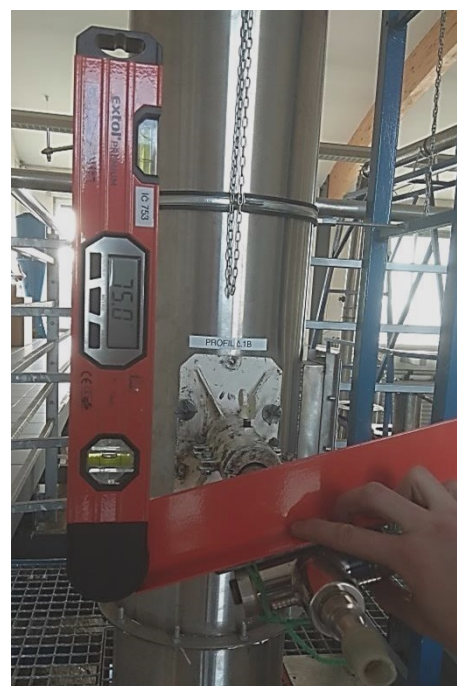
Obrázek 38 Vyrovnávací plech [Autor]



Obrázek 37 Natočení hubice ve svislém směru [Autor]

Úhloměr je nastaven na 90° , přiložen na plech a pomocí vodováhy je zkontrolováno natočení hubice ve svislém směru (viz obrázek č. 37). Je provedeno měření při izoaxiálním vzorkování. Následně je změněn úhel na úhloměru na 75° a hubice je natáčena proti směru hodinových ručiček až do dosažení rovnováhy na vodováze. Tím je docíleno natočení hubice o 15° (viz obrázek č. 39). Naměřená data jsou vyhodnocována ve dvojicích.

Stejným způsobem jsou proměřeny úhly 30° a 45° . Větší natočení možné není kvůli nárazu hubice do vnitřní stěny tratě.

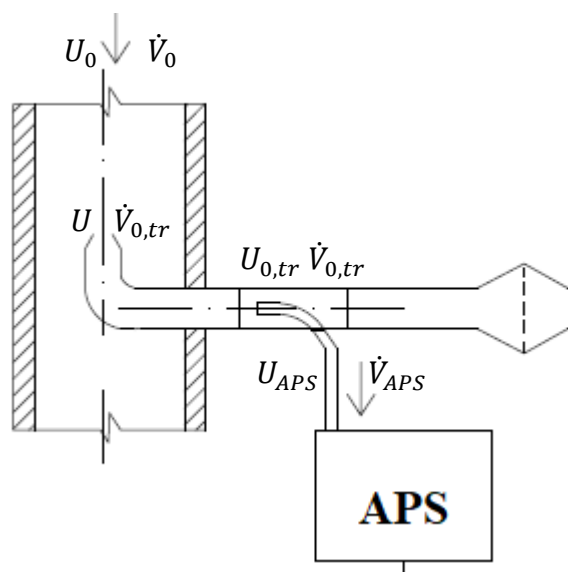


Obrázek 39 Natočení hubice o 15° [Autor]

4.4. Výpočet izokinetických parametrů

Volba vstupních parametrů do procesu měření je velmi důležitá. Zvolené parametry budou poté upravovány pro simulaci neizokinetických a neizoaxiálních vlivů na výslednou koncentraci pevných částic.

Pevně nastavenou hodnotou, kterou je nutné se při výpočtu parametrů řídit, je objemový průtok přístrojem APS, jenž je nastaven na konstantní hodnotu $0,3 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{h}^{-1}$. Odběrová trubička z rozdělovače vzorku pro přístroj APS má vnitřní průměr 2,9 mm. V rozdělovači vzorku je nutné zajistit izokinetický odběr vzorku, který bude dodržen při všech testovaných režimech vzorkování. Sled výpočtu směřuje od přístroje přes rozdělovač vzorku až k ventilátoru prašné tratě. Jednoduché schéma proudu vzorku a veličin je na obrázku č. 40.



Obrázek 40 Schéma průtokových veličin [autor]

Teoretická rychlost proudění vzdušiny v odběrové trubičce je vypočítána podle rovnice č. 29.

$$U_{APS} = \frac{\dot{V}_{APS}}{S_{APS}} = \frac{\dot{V}_{APS}}{\frac{\pi \cdot d_{APS}^2}{4}} = \dot{V}_{APS} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_{APS}^2} = \frac{0,3}{3600} \cdot \frac{4}{\pi \cdot 0,0029^2} = 12,69 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (29)$$

- \dot{V}_{APS} - objemový průtok vzduchu přístrojem APS [$\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}$]
- d_{APS} - vnitřní průměr odběrové trubičky [m]
- S_{APS} - vnitřní průřez odběrové trubičky [m^2]

Rychlost proudění v odběrové trati musí být také rovna $12,69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($U_{0,tr} = U_{APS}$). Vnitřní průměr rozdělovače vzorku a také celé odběrové tratě je 8 mm. Všechny následující výpočty, pokud není uvedeno jinak, jsou počítány podle rovnice č. 29.

$$\dot{V}_{0,tr} = U_{0,tr} \cdot S_{0,tr} \cdot 3600 = U_{APS} \cdot \frac{\pi \cdot d_{0,tr}^2}{4}$$

$$\dot{V}_{0,tr} = 12,69 \cdot \frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} = 2,297 \cong 2,3 \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{h}^{-1}]$$

- $U_{0,tr}$ - rychlost proudění vzdušiny v odběrové trati [m.s⁻¹]
- $d_{0,tr}$ - vnitřní průměr odběrové tratě a rozdělovače [m]
- $S_{0,tr}$ - vnitřní průřez odběrové tratě a rozdělovače [m²]

Vývěva odběrové tratě má nastavený průtok vzdušiny 2,3 m³_N.h⁻¹. Tento objemový průtok samozřejmě odpovídá průtoku také skrz odběrovou hubici.

V poslední řadě je nutné určit objemový průtok směsi vzdušiny a prášku prašnou trati. Dle kapitoly 4.3.1 byl zvolen rozměr odběrové hubice 15 mm pro izokinetický odběr. Podle tohoto rozměru je rovnicí č. 29 vypočítána izokinetická odběrová rychlost a následně také objemový průtok vzdušiny v prašné trati. Vnitřní průměr prašné tratě je 313 mm.

$$U = \frac{\dot{V}_{0,tr}}{S} = \frac{\dot{V}_{0,tr}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \dot{V}_{0,tr} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2} = \frac{2,3}{3600} \cdot \frac{4}{\pi \cdot 0,015^2} = 3,61 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- $\dot{V}_{0,tr}$ - objemový průtok odběrovou trati a hubicí [m³_N.s⁻¹]
- d - vnitřní průměr vstupu do odběrové hubice [m]
- S - vnitřní průřez vstupu do odběrové hubice [m²]

$$\dot{V}_0 = U_0 \cdot S_0 \cdot 3600 = U \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot 3600$$

$$\dot{V}_0 = 3,61 \cdot \frac{\pi \cdot 0,313^2}{4} \cdot 3600 = 999,97 \cong 1000 \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{h}^{-1}]$$

- U_0 - rychlost proudění vzdušiny v prašné trati [m.s⁻¹]
- d_0 - vnitřní průměr prašné tratě [m]
- S_0 - vnitřní průřez prašné tratě [m²]

Výkonnost radiálního ventilátoru prašné tratě bude nastavena na hodnotu 1000 m³_N.h⁻¹.

Dosavadní nastavené parametry odpovídají provozu prašné tratě a měřících zařízení v izokinetickém režimu, který je referenční pro všechna následná nereprezentativní měření.

V první části měření jsou testovány izoaxiální neizokinetické odběry vzorku. Izokinetický poměr rychlostí je měněn pouze změnou průměru odběrové hubice, aby v odběrové trati a rozdělovači vzorku byl zajištěn konstantní objemový průtok a izokinetický odběr vzorku do přístroje APS.

Výměnou 15mm hubice za hubici s menším průměrem vstupního průřezu získáme podle zákona kontinuity vyšší rychlost proudění. Pro konstantní objemový průtok je například pro 12mm hubici rychlost proudění vypočítána podle rovnice č. 29.

$$U_{12} = \frac{\dot{V}}{S_{2,12}} = \frac{\dot{V}_{2N}}{\frac{\pi \cdot d_{2,12}^2}{4}} = \frac{2,3}{3600} \cdot \frac{4}{\pi \cdot 0,012^2} = 5,65 \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

- \dot{V} - objemový průtok hubicí $[\text{m}^3_{\text{N}}.\text{h}^{-1}]$
- d_{12} - vnitřní průměr 12mm hubice $[\text{m}]$
- S_{12} - vnitřní průřez 12mm hubice $[\text{m}^2]$

Odběrová rychlost se změnila z $3,61 \text{ m.s}^{-1}$ na $5,65 \text{ m.s}^{-1}$ a je dosaženo super-izokinetického režimu vzorkování (neboli přesávání). Změní se izokinetický poměr rychlostí (viz rovnici č. 3).

$$\omega = \frac{U_{12}}{U_0} = \frac{5,65}{3,61} = 1,565 \quad [-]$$

- U_0 - teoretická rychlost proudění v trati $[\text{m.s}^{-1}]$
- U_{12} - teoretická rychlost proudění v ústí hubice $[\text{m.s}^{-1}]$

Všechny izokinetické poměry hubic v sadě jsou vypočítány stejným postupem a jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Průměr hubice [mm]	Průřez hubice [m ²]	Teoretický průtok [m ³ _N .h ⁻¹]	Teoretický průtok [m ³ _N .s ⁻¹]	Teoretická rychlost v hubici [m.s ⁻¹]	Teoretická rychlost v potrubí [m.s ⁻¹]	Izokinetický poměr [-]
6	$28,3 \cdot 10^{-6}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	22,64	3,61	6,27
8	$50,3 \cdot 10^{-6}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	12,71	3,61	3,52
10	$78,5 \cdot 10^{-6}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	8,13	3,61	2,25
12	$11,3 \cdot 10^{-5}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	5,65	3,61	1,56
15	$17,7 \cdot 10^{-5}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	3,61	3,61	1,00
18	$25,4 \cdot 10^{-5}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	2,51	3,61	0,70
21	$34,6 \cdot 10^{-5}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	1,84	3,61	0,51
25	$49,1 \cdot 10^{-5}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	1,30	3,61	0,36
30	$70,7 \cdot 10^{-5}$	2,3	$6,39 \cdot 10^{-4}$	0,90	3,61	0,25

Tabulka 6 Rychlosti v odběrových hubicích a izokinetické poměry rychlostí

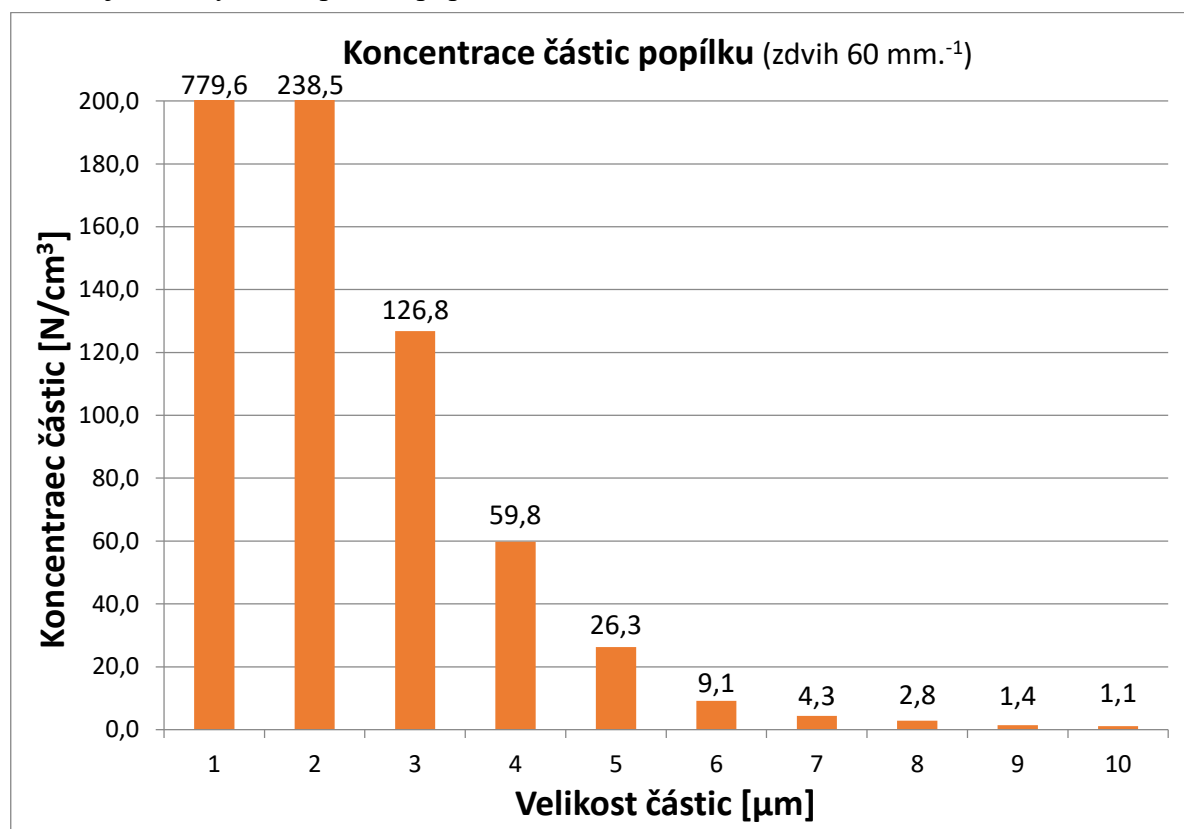
Veškeré nastavitelné parametry jsou tedy určeny. Jsou zachovány pro veškerá měření izoaxiální i anizoaxiální. Jedinými proměnnými jsou tedy velikost vstupního průřezu odběrové hubice a tedy vzorkovací rychlost. Při měření anizoaxiálních vlivů bude zachován izokinetický režim vzorkování a hubice bude pouze natáčena ve směru normály k ose prašné tratě.

4.5. Volba materiálu pro měření

Při zkouškách měření na sestavené měřicí trati jsem měl možnost vyzkoušet několik druhů prášků. Nejdůležitějším parametrem pro vhodný prášek byla četnost pevných částic v rozmezí 1 až 10 μm . Měřené četnosti by se neměly pohybovat pod mezí detekce přístroje, čili v číslech menších než 1 částice na cm^3 .

Nejdříve byl testován prášek oxidu hlinitého s obsahem částic 5 μm a menších s rychlostí zdvihu podávacího pístu 30 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Bohužel však zdaleka nedosahoval požadovaných koncentrací částic v daném rozmezí, v němž se měřitelnými zdály pouze velikosti částic 1 až 3 μm . Další testovaný materiál byl rovněž oxid hlinitý, tentokrát s částicemi 9 μm a menšími. Výsledky měření byly velmi obdobné, četnosti částic velikostí 4 až 10 μm se pohybovaly hluboko pod mezí detekce přístroje.

Třetí pokus měření proběhl s použitím popílku, který byl zachycený v elektrostatickém odlučovači za černouhelným kotlem a odebraný v roce 2011. Byl poté používán pro porovnávací zkoušky na prašné trati. Popílek byl přesetý přes 212 μm síto. Výsledky měření popílku byly téměř přijatelné. Pod mezí detekce se pohybovaly pouze koncentrace 9 μm a 10 μm částic. Zvýšil jsem tedy rychlost zdvihu podávacího pístu na 60 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, což se promítlo na přibližně dvojnásobně větší koncentraci částic. Naměřená četnost částic popílku při zdvihu 60 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ je zobrazena v grafu č. 1. Pro měření jsem tedy zvolil použití popílku.



Graf 1 Koncentrace pevných částic v popílku

5. Výsledky měření a teoretické výpočty

5.1. Vliv neizokinetiky na měřenou koncentraci

Podle daného postupu měření z kapitoly 4.3 jsem provedl měření pro jednotlivé odběrové hubice s tupou a ostrou vstupní hranou.

Měření jsem prováděl pro referenční 15mm hubici, pro kterou jsou parametry prašné tratě nastaveny na hodnoty odpovídající izokinetickému odběru. Každou hubici jsem testoval ve dvojici právě s referenční hubicí. Naměřená data jsem porovnával pouze v rámci těchto dvojic. Důvodem pro tento postup je nehomogenita vrstev popílku v podávacím válci a tedy rozdílné podávané množství částic do prašné tratě v průběhu podávání. Při měření každé hubice jsem odebíral celkem 40 vzorků s dobou vzorkování 10 sekund.

Přístroj APS zařazuje částice do celkem 52 velikostních kategorií. Používám data pouze z 10 kanálů, jejichž velikosti jsou nejbližší celým číslem od 1 do 10 μm . Například částice započítané do kanálu o velikosti 0,965 μm považuji za 1 μm částice (viz tabulku č. 7).

Velikost částic [μm]					
0,835	0,898	0,965	1,037	1,114	1,197

Tabulka 7 Kanály APS o velikosti přibližně 1 μm

Daným průměrům hubic odpovídají izokinetické poměry rychlostí (viz tabulku č. 6). Koncentrace částic naměřené všemi hubicemi porovnávám poměrem s referenční 15mm hubicí, která odpovídá izokinetickému odběru. V rovnici č. 34 je uveden příklad výpočtu pro 12mm hubici (izokinetický poměr 1,56) a naměřené koncentrace částic o velikosti 3 μm .

$$x_{3,12} = \frac{c_{3,12}}{c_{3,15}} = \frac{187}{197} = 0,949 \quad [-] \quad (34)$$

- $x_{3,12}$ - poměr naměřených koncentrací 1 μm částic [-]
- $c_{3,12}$ - koncentrace 1 μm částic, hubice 12 mm [$\text{N} \cdot \text{cm}^{-3}$]
- $c_{3,15}$ - koncentrace 1 μm částic, hubice 15 mm [$\text{N} \cdot \text{cm}^{-3}$]

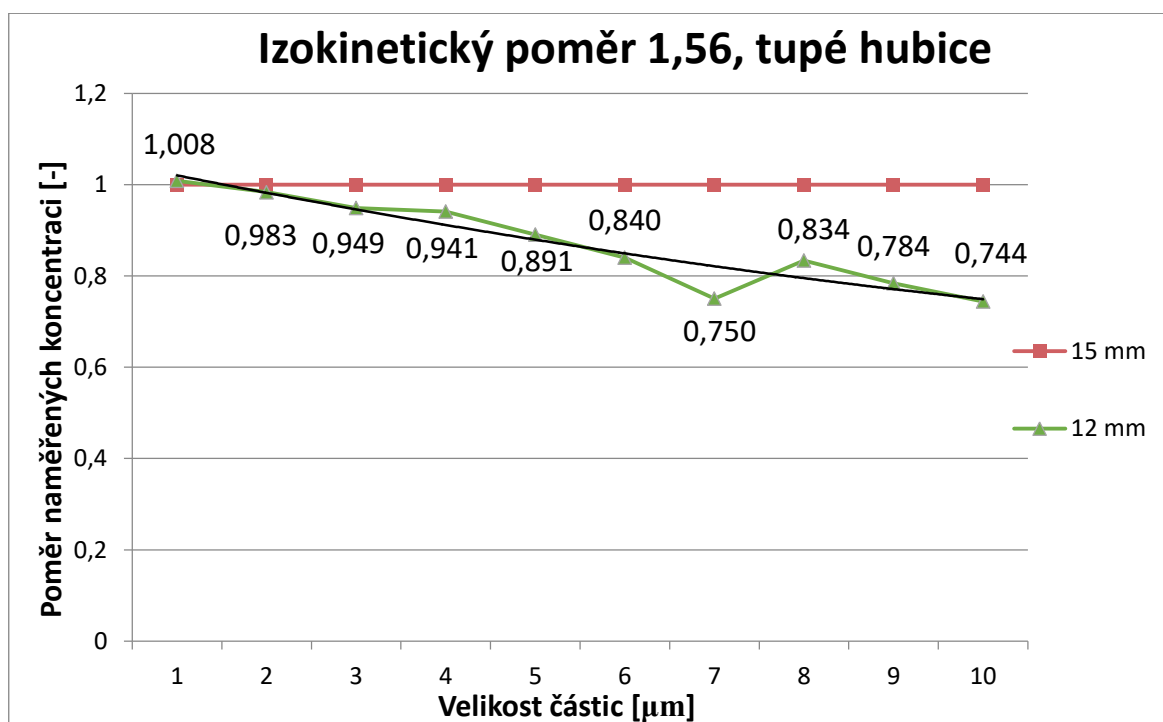
5.1.1. Výsledky pro hubice s tupou hranou

Podsávání	Velikost částic [μm]										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Izokinetický poměr [-]	Poměr naměřených koncentrací [-]									
	0,25	1,125	1,188	1,263	1,425	1,622	1,878	2,252	2,487	2,667	2,773
	0,36	1,037	1,066	1,103	1,176	1,338	1,458	1,689	1,810	1,898	2,044
	0,51	1,030	1,031	1,074	1,134	1,322	1,404	1,557	1,596	1,751	1,850
	0,70	1,079	1,105	1,147	1,188	1,271	1,348	1,478	1,517	1,543	1,456
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1,56	1,008	0,983	0,949	0,941	0,891	0,840	0,750	0,834	0,784	0,744
	2,25	0,957	0,921	0,888	0,820	0,782	0,726	0,635	0,655	0,599	0,570
Přesávání	3,52	0,983	0,927	0,874	0,831	0,736	0,684	0,651	0,651	0,591	0,541
	6,25	1,058	0,969	0,926	0,899	0,808	0,692	0,560	0,484	0,458	0,461

Tabulka 8 Poměry naměřených koncentrací při izoaxiálních odběrech tupými hubicemi

Výsledky měření ukazují rostoucí trend koncentrace při podsávání (sub-izokinetickém odběru) a klesající trend koncentrace při přesávání (super-izokinetickém odběru) vzorku vzdušiny. V tabulce č. 8 jsou uvedeny veškeré poměry naměřených koncentrací mezi referenční 15mm hubicí a příslušnou hubicí odpovídající izokinetickému poměru v levém sloupci tabulky. Pro přehlednost jsou hodnoty poměrů barevně odlišeny. Zelenou barvou jsou označeny vyšší hodnoty koncentrace a červenou barvou hodnoty nižší než 1.

V grafu č. 2 jsou pro příklad vykreslena data pro přesávání při izokinetickém poměru 1,56. Červenou barvou je pro porovnání zavedena křivka představující referenční hubici o velikosti 15 mm, při jejímž použití odběr odpovídá izokinetice. Zelená křivka zobrazuje poměrné koncentrace částic všech sledovaných velikostí. Podle teorie by měl trend změny koncentrace být čistě klesající, ale zde je viditelná výchylka u koncentrace $7\mu\text{m}$ částic a velmi malá, až zanedbatelná výchylka u $1\mu\text{m}$ částic (pouze 0,8 %). Je to dáno nepřesností měření a nehomogenitou podávaného prášku. Jestliže data proložím polynomicou regresní křivkou (černá křivka v grafu), odchylky od teoretického standardu se srovnají. Závěrem tohoto měření je, že se při přesávání snižují měřené koncentrace částic s ohledem na jejich velikost.

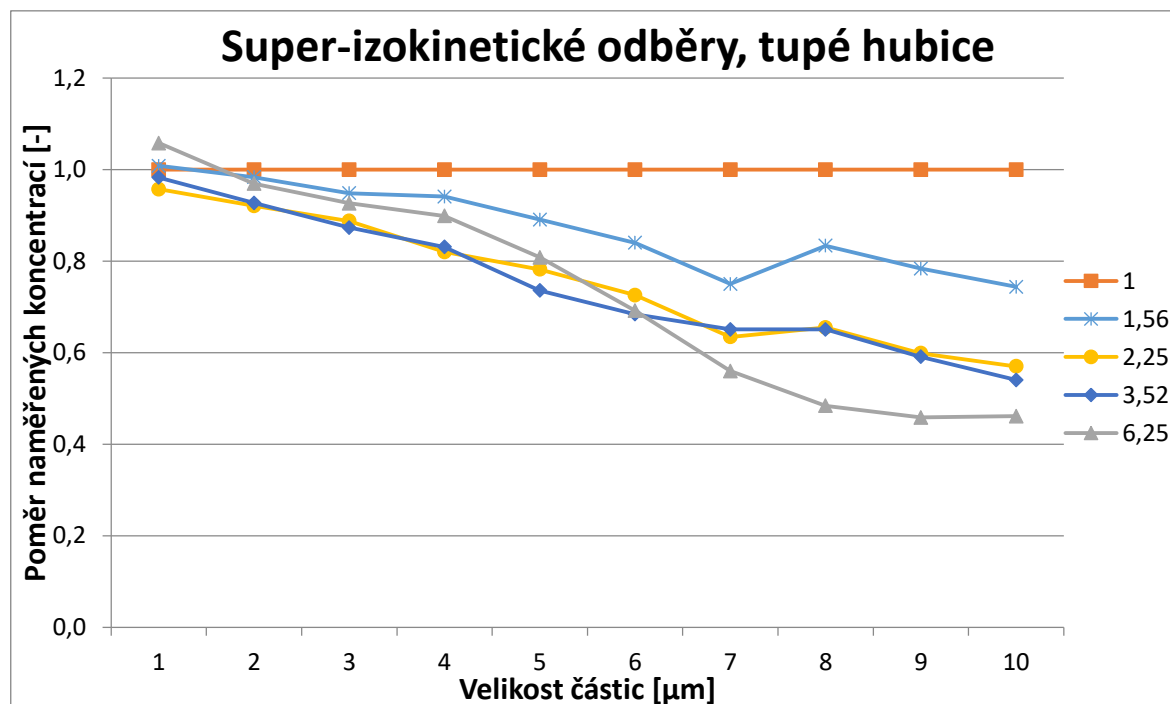


Graf 2 Porovnání naměřených koncentrací při izokinetickém poměru 1,56

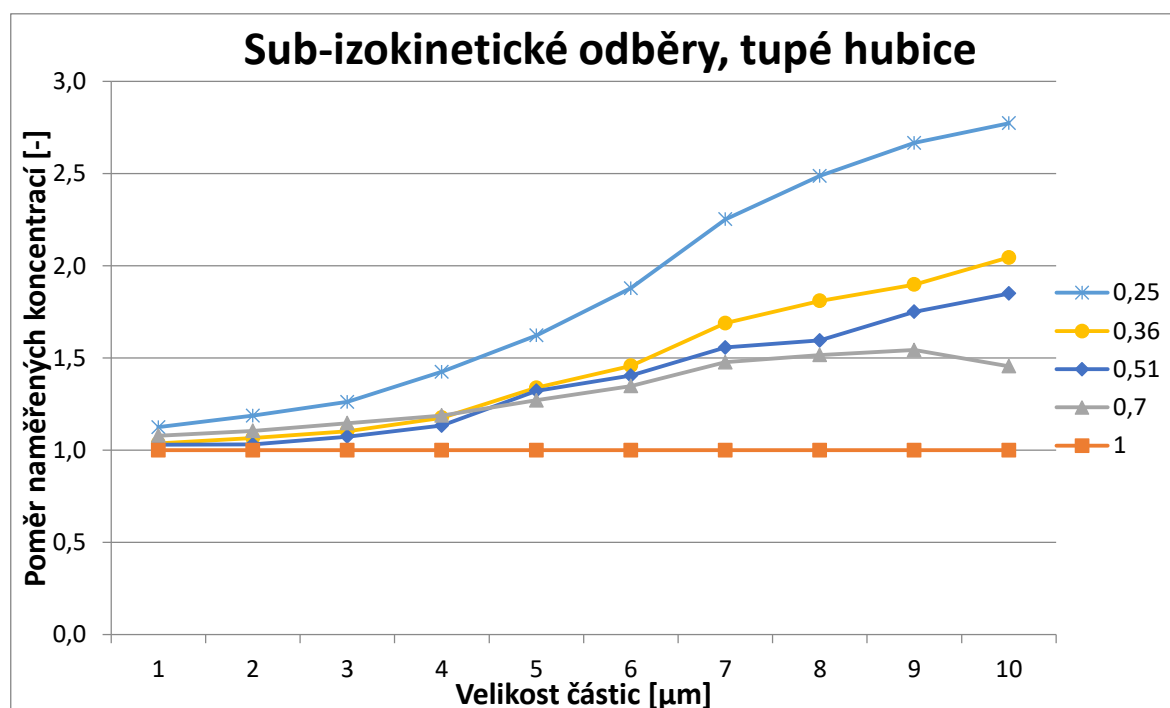
V grafu č. 3 jsou shrnuty výsledky super-izokinetických odběrů vzorků tupými hubicemi. Zde jsou již křivky označeny podle příslušného izokinetického poměru rychlostí od $\omega = 1,56$ (12mm hubice) do $\omega = 6,25$ (6mm hubice). Částice mezi 1 μm a 5 μm vykazují velmi podobné trendy poměrů koncentrací při všech izokinetických poměrech. Je zde viditelný úkaz, že malé 1 μm a 2 μm částice nejsou neizokinetickými odběry příliš ovlivněny. Velmi zřejmý je průběh křivky pro $\omega = 6,25$ v oblasti 1 μm až 5 μm částic, který je zdá se nesprávný. Podle teorie z literatury by měly koncentrace těchto částic být nejnížší ze všech testovaných izokinetických poměrů. Dle mého úsudku však je křivka v pořádku. Přesávání v tomto případě je tak silné, že se menší částice nasávají s trochu vyšší účinností, protože jejich setrvačné síly nestačí na opuštění trajektorií svých proudnic vzdušiny. Trendy křivek v oblasti větších částic jsou naopak více rozdílné. Nejnížší hodnoty koncentrací se pohybují přibližně na hodnotě 45 % původního izokinetického odběru. Při izokinetických poměrech 2,25 a 3,52 jsou změny koncentrací téměř totožné.

U sub-izokinetických odběrů (viz graf č. 4) jsou pozorovatelné podobné jevy. Menší částice mezi 1 a 2 μm nejsou podsáváním velmi ovlivněny, kromě tedy extrémního podsávání při izokinetickém poměru 0,25. Obecně je ale naplněno očekávání z teoretického základu. Čím větší částice a čím větší podsávání, tím větší je odchylka naměřené koncentrace částic oproti izokinetickému odběru. Koncentrace dosahují až 2,8 násobku původních hodnot pro velké částice.

Každopádně jakákoliv forma neizokinetického odběru vede k nereprezentativním výsledkům měření. Jednotlivé detailní grafy pro všechny režimy odběrů jsou uvedeny v přílohách č. 1 a 2.



Graf 3 Souhrn super-izokinetických odběrů tupými hubicemi

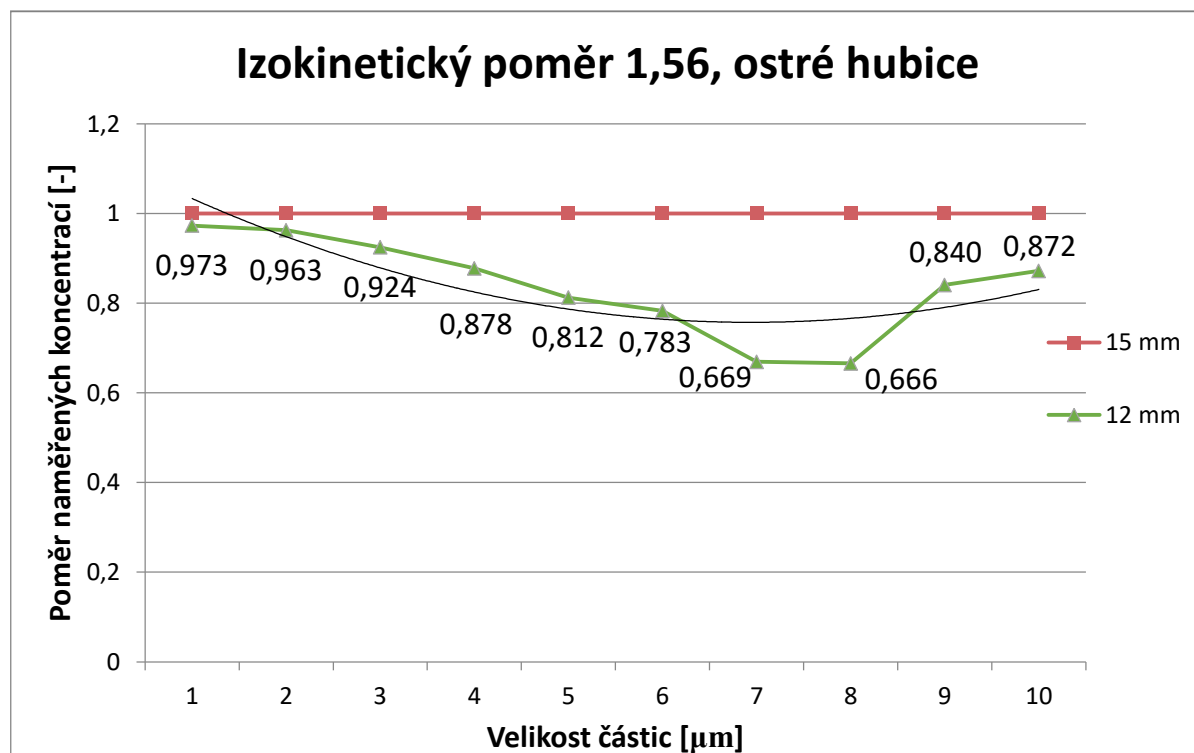


Graf 4 Souhrn sub-izokinetických odběrů tupými hubicemi

5.1.2. Výsledky pro hubice s ostrou hranou

		Velikost částic [μm]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Podávání	Izokinetický poměr [-]	Poměr naměřených koncentrací [-]									
	0,25	1,351	1,383	1,470	1,651	1,828	2,070	2,596	2,637	2,834	3,625
	0,36	0,976	0,997	1,064	1,224	1,345	1,475	1,792	1,932	1,832	2,551
	0,51	1,045	1,069	1,157	1,262	1,386	1,555	1,926	2,002	2,350	2,699
	0,70	1,009	1,027	1,045	1,092	1,165	1,186	1,274	1,290	1,281	1,250
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1,56	0,973	0,963	0,924	0,878	0,812	0,783	0,669	0,666	0,840	0,872
	2,25	1,002	0,952	0,867	0,775	0,659	0,556	0,444	0,410	0,388	0,385
	3,52	0,985	0,954	0,888	0,815	0,712	0,621	0,538	0,497	0,480	0,514
	6,25	1,004	0,916	0,850	0,831	0,778	0,713	0,569	0,582	0,459	0,388
Přesávání											

Tabulka 9 Poměry naměřených koncentrací při izoaxiálních odběrech ostrými hubicemi

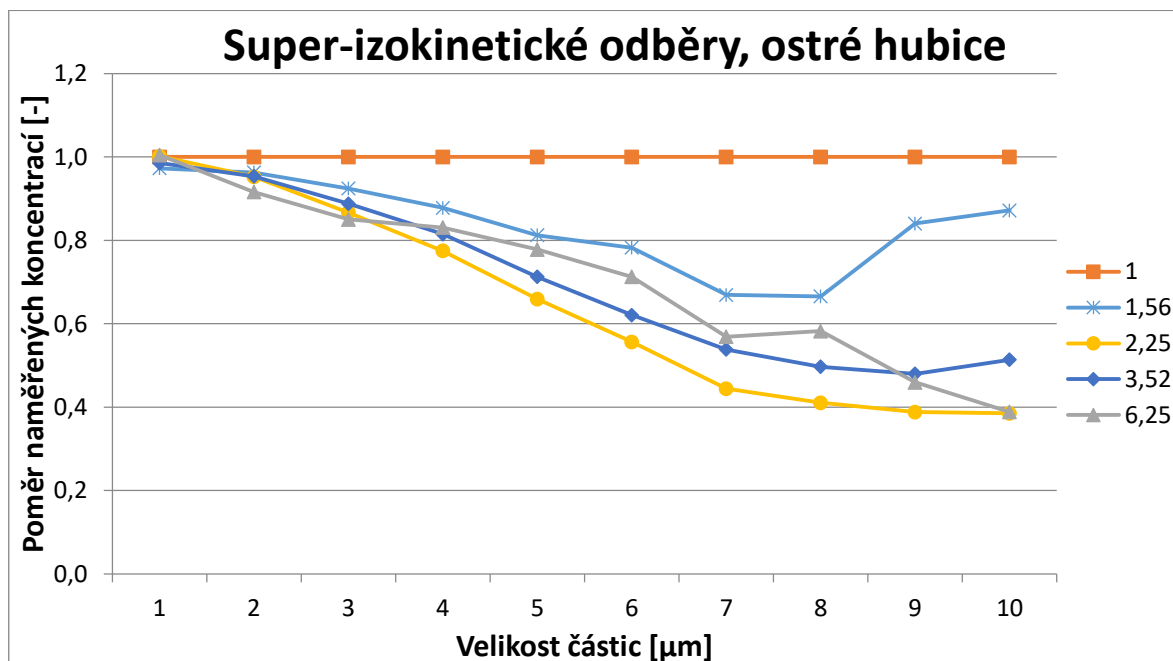


Graf 5 Porovnání naměřených koncentrací při izokinetickém poměru 1,56

Naměřená data pro ostré hubice rovněž vykazují rostoucí koncentraci částic při podsávání a klesající koncentraci při přesávání. Vyskytuje se zde na první pohled několik výchylek od normálu z hlediska vyšší nebo nižší naměřené koncentrace, stejně jako v případě tupých hubic (viz tabulku č. 9).

Jako příklad je v grafu č. 5 uvedeno porovnání 12mm ostré hubice s 15mm ostrou hubicí. Zřetelnou výchylku lze pozorovat u částic o velikosti 9 μm a 10 μm . Za tento jev pravděpodobně může hlavně nehomogenita podávaného prášku. Větší částice se ve

vzorku vyskytují v jednotkách kusů v 1 cm^3 a malé změny v podávané koncentraci se při jejich měření projeví ve větší míře než například u $2\mu\text{m}$ částic, které byly měřeny v řádu stovek. Černá křivka je opět polynomickeou regresní křivkou, která data nahrazuje plynulou funkcí bez odchylek. Bohužel v tomto případě u větších částic její průběh směřuje k vyšším hodnotám poměru koncentrací. Kromě této výchyly však koncentrace klesají odpovídajícím způsobem.



Graf 6 Souhrn super-izokinetických odběrů ostrými hubicemi

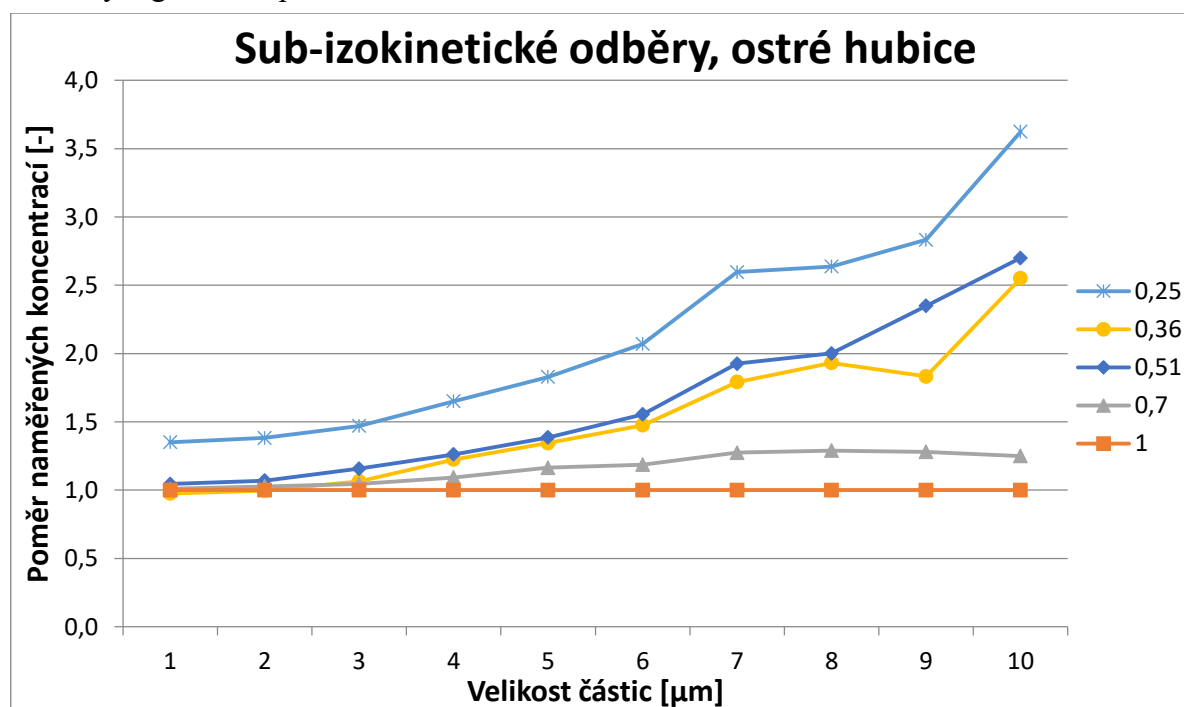
V grafu č. 6 jsou shrnuty výsledky super-izokinetických odběrů vzorků ostrými hubicemi. Křivky jsou označeny podle příslušného izokinetického poměru rychlostí od $\omega = 1,56$ (12mm hubice) do $\omega = 6,25$ (6mm hubice).

V porovnání se super-izokinetickými odběry tupými hubicemi (viz graf č. 3) jsou poklesy koncentrací pevných částic viditelně strmější a dosahují také nižších hodnot oproti tupým hubicím. Velmi zajímavé jsou však naměřené koncentrace při izokinetickém poměru $\omega = 2,25$, jejichž průběh v grafu je na nejnižších hodnotách. Křivka izokinetického poměru $\omega = 6,25$ by měla podle teorie být ještě níže, ale je odchýlena k vyšším hodnotám a pouze u $10\mu\text{m}$ částic je alespoň na stejné hodnotě. Je možné, že jde o nepřesné měření, nicméně naměřená data tomu nenasvědčují. Nominální hodnoty koncentrací pro všechny velikosti částic jsou v obou případech velmi podobné. Lze tedy vyloučit výrazný vliv nehomogenity podávaného prášku. Poměr $\omega = 2,25$ zde představuje pravděpodobně jistý inflexní bod, za kterým se koncentrace částic nesnižují, ale opět zvyšují.

Sub-izokinetické odběry ostrými hubicemi (viz graf č. 7) v podstatě odpovídají teorii. Čím nižší izokinetický poměr (nebo vyšší poměr rychlostí (U_0/U), tím větší budou účinnosti aspirace a vstupu částic do vzorkovacího zařízení.

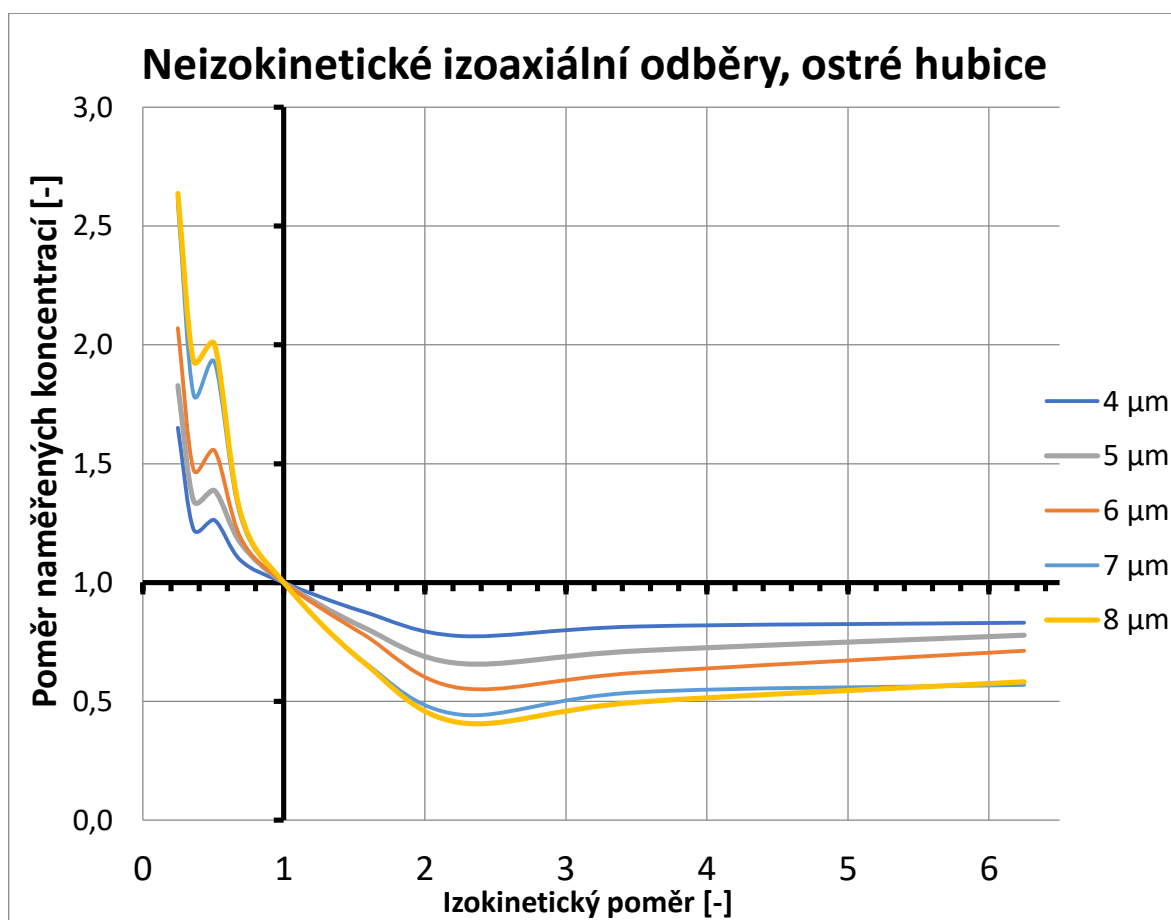
Velmi blízko sebe však jsou křivky pro izokinetický poměr 0,51 a 0,36 a jsou takřka zaměněny. Při pohledu na super-izokinetické odběry lze pozorovat stejný jev. Z těchto dat tedy lze usoudit, že 2 krát větší nebo menší rychlost vzorkování ostrou hubicí oproti izokinetice způsobí větší odchylky v koncentracích, než 3 krát větší nebo menší rychlost.

Nasávání menších částic od 1 do 3 μm není podsáváním příliš ovlivněno. U větších částic se již začínají utvářet rozdíly mezi křivkami. Hodnoty při izokinetickém poměru $\omega = 0,25$ dosahují až extrémních hodnot po celém sledovaném rozsahu velikostí částic. Není pouze nižší odběrová rychlost, ale je také větší vstupní průřez hubice, což jistým způsobem také napomáhá k nasávání pevných částic. Detailní průběhy koncentrací jsou uvedeny v grafech v přílohách č. 4 a 5.



Graf 7 Souhrn sub-izokinetických odběrů ostrými hubicemi

K demonstraci zjištěného jevu jak u sub-izokinetických, tak u super-izokinetických odběrů jsou v grafu č. 8 uvedeny křivky pro částice o velikosti 4 až 8 μm . Na koncentracích těchto částic je jev zřetelně pozorovatelný a křivky vykazují velmi podobný průběh. Menší částice jsou vynechány z důvodu nevýrazných a nejednoznačných změn koncentrací.



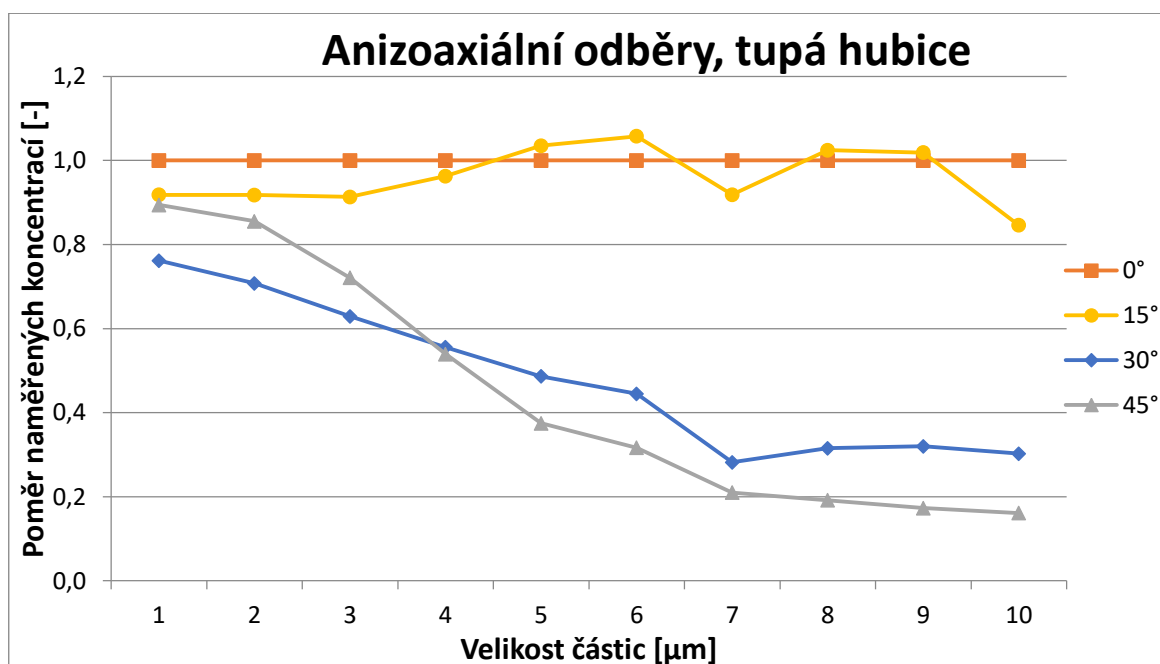
Graf 8 Souhrn neizokinetických odběrů ostrými hubicemi; částice 4 - 8 μm

5.2. Vliv natočení hubice na měřenou koncentraci

Při měření anizoaxiálních odběrů vzorků postupují podle metodiky v kapitole 4.3.2. Bohužel kvůli fyzickým možnostem prašné tratě je měření omezeno na tři úhly natočení - 15°, 30° a 45°, protože dochází k dotyku hubice a vnitřní stěny prašné tratě při natočení sondy o 47°. Ke zjištění, jak nereprezentativní anizoaxiální měření ve skutečnosti je, však postačí. Koncentrace jsou měřeny pouze pomocí 15mm ostré a 15mm tupé hubice, tedy při dodržení podmínky izokinetiky.

V grafu č. 9 jsou vykresleny křivky podle naměřených hodnot tupou hubicí. Při natočení o 15° koncentrace částic vyšly nejednoznačně. Podle teorie by měly vyjít každopádně nižší, protože hubice již nesměruje přesně proti proudu vzdušiny a má tedy menší vstupní průřez právě ve směru proudění vzdušiny. V tomto případě však pravděpodobně jde o nehomogenní rozložení částic jak v samotném prášku, tak v proudící vzdušině, a popřípadě jisté nepřesnosti měření.

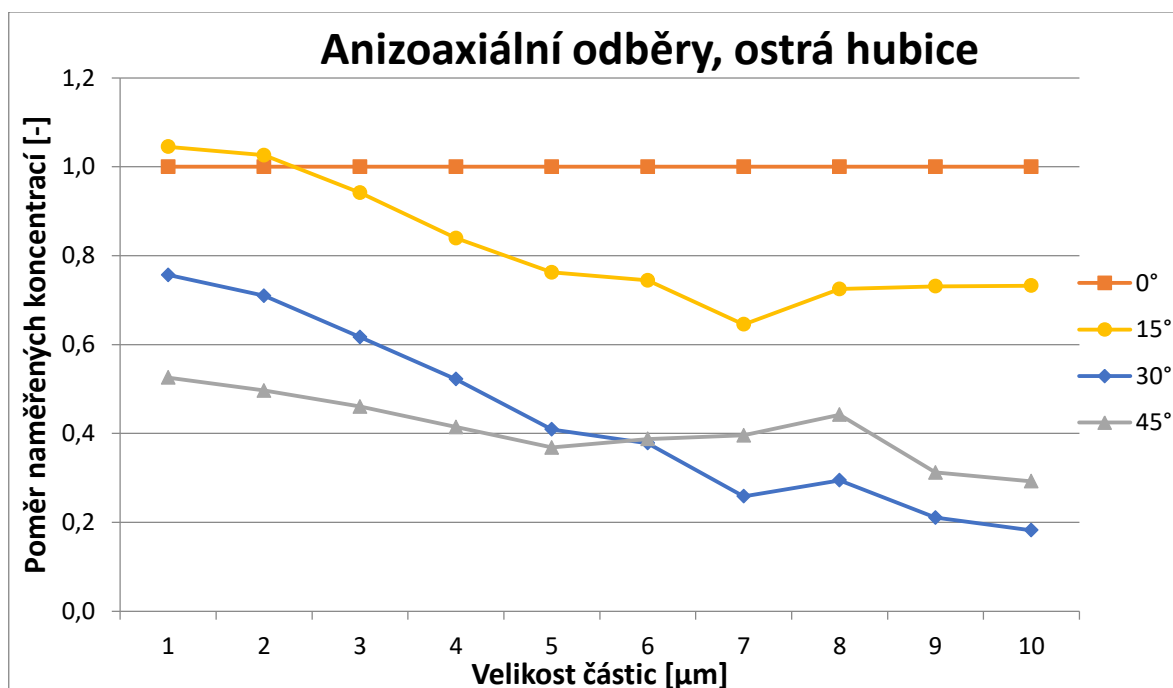
Křivky pro natočení o 30° a 45° jsou naopak s velkou pravděpodobností celkem odpovídající. V oblasti menších částic jsou prakticky zaměněny, což se v inflexním bodě okolo 4 μm obrací ve správný průběh. Natočením o 45° hubice nasává vzorek z okraje potrubí prašné tratě, což podle normy (viz kapitolu 3.1) rozhodně není vhodný vzorkovací bod. Nasávané proudnice jsou značně ovlivněny stěnou potrubí.



Graf 9 Souhrn anizoaxiálních odběrů tupou hubicí

Výsledky pro izokinetické anizoaxiální odběry ostrou hubicí (viz graf č. 10) vyhlíží trochu věrohodněji, co se týče přesnosti měření. Křivka pro natočení o úhel 15° je velmi podobná izoaxiálnímu odběru při izokinetickém poměru rychlostí $\omega = 1,56$ (viz graf č. 5). Natočení o 30° a 45° vytvořilo data v podstatě opačné povahy oproti stejným křivkám pro tupou hubici, s rozdílem v pozici inflexního bodu, který se posunul do oblasti 6 μm .

Oba tyto jevy jsou zřejmě způsobeny faktem, že při natočení hubice o 45° je ústí hubice velmi blízko vnitřní stěně potrubí. Každopádně je v těchto oblastech přítomna rozdílná koncentrace částic než v ose potrubní tratě.

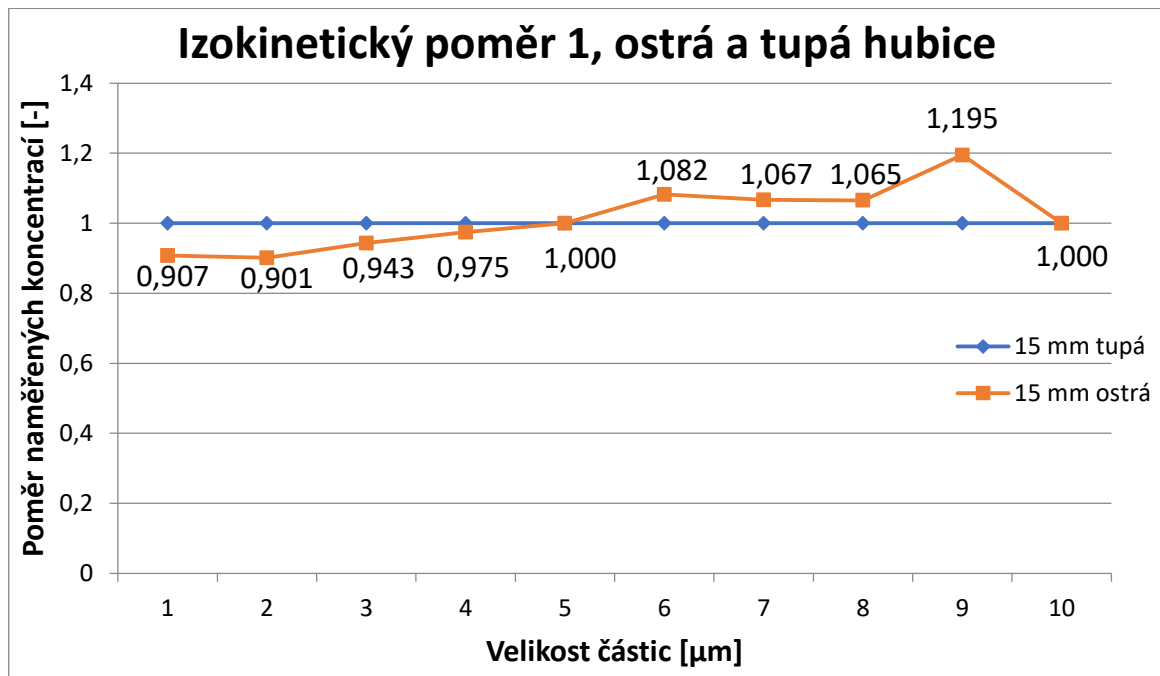


Graf 10 Souhrn anizoaxiálních odběrů ostrou hubicí

5.3. Vliv změny tvaru hubice na měřenou koncentraci

Z předchozích výsledků měření jsou viditelné rozdíly mezi hubicemi s tupou hranou a hubicemi s ostrou hranou. Tupou hubici považují při tomto měření za referenční a porovnávají s ní hubici ostrou. V grafu č. 11 jsou vykresleny výsledky měření.

Výsledky měření naznačují, že ostrá hubice při izokinetickém odběru nasává menší množství malých částic (1 až 5 μm) a větší množství větších částic (6 až 10 μm) než tupá hubice. Při pohledu na předchozí výsledky neizokinetických odběrů jak ostrými tak tupými hubicemi není tento jev obecně pozorovatelný. Při super-izokinetickém odběru (přesávání) ostré hubice dosahují obecně menších procentuálních hodnot koncentrací, než tupé hubice. Při podsávání v oblasti menších částic ostré hubice naměřily mírně menší poměrné koncentrace, než tupé hubice, avšak u větších částic dosahují mnohem vyšších extrémních hodnot. Odchyłky oproti referenční hubici se pohybují v rozmezí $\pm 10\%$, s výjimkou u 9 μm částic.



Graf 11 Porovnání naměřených koncentrací mezi 15mm tupou a 15mm ostrou hubicí

Výsledky lze pravděpodobně spojit pouze s izokinetickými až sub-izokinetickými odběry. Je možné, že výsledky zkreslily nepřesnosti měření a tento jev by teoreticky mohl platit i při přesávání. Vyžadovalo by to však větší množství měření s referenčním práškem, který by měl konstantní rozložení částic.

5.4. Teoretický výpočet neizokinetického odběru

Výpočet neizokinetických odběrů provádím podle teorie z kapitoly 3.3.1. Předpokládám teplotu vzduchu 20 °C a tlak 98 kPa. Částice dělím pouze do 3 kategorií 1 μm, 5 μm a 10 μm a jejich hustotu volím 1000 kg.m⁻³ (viz tabulku č. 10). Ostatní volené parametry jsou shodné s provedenými měřeními. Výpočet tedy provádím pro stejné velikosti odběrových hubic a tedy i stejné rychlostní poměry jako při reálném měření. Hustota a kinematická viskozita vzduchu je určena podle online tabulek CoolProp pro danou teplotu a tlak. Tyto parametry jsou pro všechny výpočty konstantní. Pro příklad postupu výpočtu volím hubici 30 mm a částice o velikosti 1 μm.

Teplota	K	293,15
Tlak	kPa	98
Hustota částic	kg.m ⁻³	1000
Hustota vzduchu	kg.m ⁻³	1,165
Kinematická viskozita	m ² .s ⁻¹	1,53.10 ⁻⁵
Rychlost v potrubí	m.s ⁻¹	3,61

Tabulka 10 Zvolené výpočetní parametry

Jako kontrolní ukazatel režimu proudění v ústí hubice počítám Reynoldsovo číslo podle rovnice č. 35.

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} = \frac{0,9 \cdot 0,03}{1,53 \cdot 10^{-5}} = 1764 \quad [-] \quad (35) \quad [17]$$

- U - rychlost proudění v ústí hubice [m.s⁻¹]
- d - vstupní průměr hubice [m]
- ν - kinematická viskozita vzduchu [m².s⁻¹]

Proudění je v tomto případě laminární. Pro hubici o průměru 25 mm je také laminární a pro všechny ostatní hubice je již turbulentní s Reynoldsovým číslem větším než 2320.

Při výpočtech je nutné zohlednit tzv. skluz částic. Molekuly částic mohou při proudění narážet do jiných částic nebo objektů (například stěny potrubí) a proudění je v tzv. kontinuálním režimu. Částice mohou také proklouznout mezi částicemi bez nárazů a budou tak mít větší rychlost. Jsou tedy v tzv. skluzném režimu. Tento jev se do výpočtu zařazuje pomocí Cunninghamova korekčního faktoru skluzu (viz rovnici č. 36).

$$C_c = 1 + \frac{1}{p \cdot d_p} \cdot [15,6 + 7 \cdot e^{-0,059 \cdot p \cdot d_p}]$$

$$C_c = 1 + \frac{1}{98 \cdot 1} \cdot [15,6 + 7 \cdot e^{-0,059 \cdot 98 \cdot 1}] = 1,16 \quad [-] \quad (36) \quad [17]$$

- p - tlak v potrubí [kPa]
- d_p - průměr částice [μm]

Doba relaxace částic vyjadřuje dobu, za kterou se částice přizpůsobí okolní rychlosti proudění (viz rovnici č. 37). Čím větší jsou částice, tím delší je doba relaxace.

$$\tau = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot C_c}{18 \cdot \eta} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot C_c}{18 \cdot \rho \cdot \nu}$$

$$\tau = \frac{1000 \cdot (1 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,16}{18 \cdot 1,165 \cdot 1,53 \cdot 10^{-5}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \quad [\text{s}] \quad (37) \quad [17]$$

- ρ_p - hustota částice $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
- ρ - hustota vzduchu $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Stokesovo korekční číslo vyjadřuje poměr tzv. brzdě dráhy, na které se částice přizpůsobí náhlé změně podmínek proudění, a jistého charakteristického rozměru (viz rovnici č. 5). Ten je v případě odběru vzorku vstupním průměrem vzorkovací hubice.

$$Stk = \frac{S}{d} = \frac{U_0 \cdot \tau}{d} = \frac{3,61 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}}{0,03} = 4,3 \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

- S - brzdě dráha $[\text{m}]$
- ρ - hustota vzduchu $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Výpočet účinnosti aspirace (nasávání) částic η_{asp} odběrovou hubicí volím podle Radera a Marpla (rovnice č. 6). Stokesova čísla vychází relativně velmi nízká, v řádech 10^{-4} až 10^{-1} , a tento vzorec je svým rozsahem použitelnosti k těmto hodnotám nejbližší ($0,005 \leq Stk \leq 10$ a $0,2 \leq U_0/U \leq 5$).

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] \cdot [1 - (1 + 3,77 \cdot Stk^{0,883})^{-1}]$$

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{3,61}{0,9} - 1 \right] \cdot [1 - (1 + 3,77 \cdot 0,0381^{0,883})^{-1}] = 1,52 \quad [-]$$

Měření provádím ve vertikálním proudě vzdušiny, tudíž odpadá jakákoliv gravitační depozice částic v trysce. Tento výpočet se týká sub-izokinetického odběru, ztráty odběru tedy vyplývají také z usazování částic na vnitřní stěně trysky podle rovnice č. 12.

$$\eta_{trans,inert} = \frac{1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] / \left[1 + \frac{2,66}{Stk^{2/3}} \right]}{1 + \left[\frac{U_0}{U} - 1 \right] / \left[1 + \frac{0,418}{Stk} \right]}$$

$$\eta_{trans,inert} = \frac{1 + \left[\frac{3,61}{0,9} - 1 \right] / \left[1 + \frac{2,66}{0,0381^{2/3}} \right]}{1 + \left[\frac{3,61}{0,9} - 1 \right] / \left[1 + \frac{0,418}{0,0381} \right]} = 0,8 \quad [-]$$

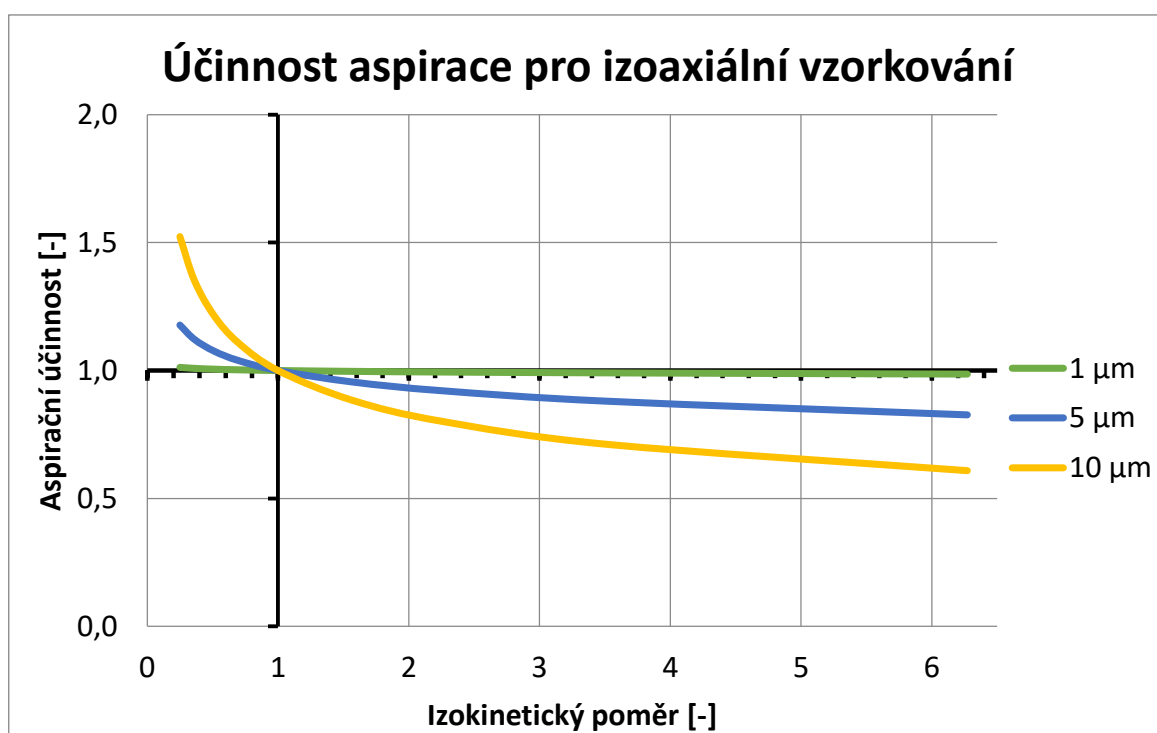
Celková účinnost vstupu částic je dána součinem obou aplikovaných účinností a je vypočítána podle rovnice č. 15.

$$\eta_{vstup} = \eta_{asp} \cdot \eta_{trans,inert} = 1,52 \cdot 0,8 = 1,216 \quad [-]$$

Jestliže zanedbáme ztráty ukládání částic na vnitřní stěně trysky, můžeme sledovat změny v naměřených koncentracích pouze na základě účinnosti aspirace (izokinetického efektu) v souvislosti s izokinetickým poměrem rychlostí ω . Vypočítané účinnosti aspirace (nasávání) částic jsou uvedeny v tabulce č. 11 pro každou kombinaci izokinetického poměru rychlostí a velikosti částic.

	Aerodynamická velikost částic [μm]		
	1	5	10
Izokinetický poměr [-]	Účinnost aspirace částic [-]		
0,25	1,01	1,18	1,52
0,36	1,01	1,12	1,35
0,51	1,01	1,08	1,22
0,70	1,00	1,04	1,11
1,00	1,00	1,00	1,00
1,57	1,00	0,96	0,88
2,25	0,99	0,92	0,80
3,52	0,99	0,88	0,71
6,27	0,99	0,83	0,61

Tabulka 11 Účinnost aspirace částic pro izoaxiální vzorkování



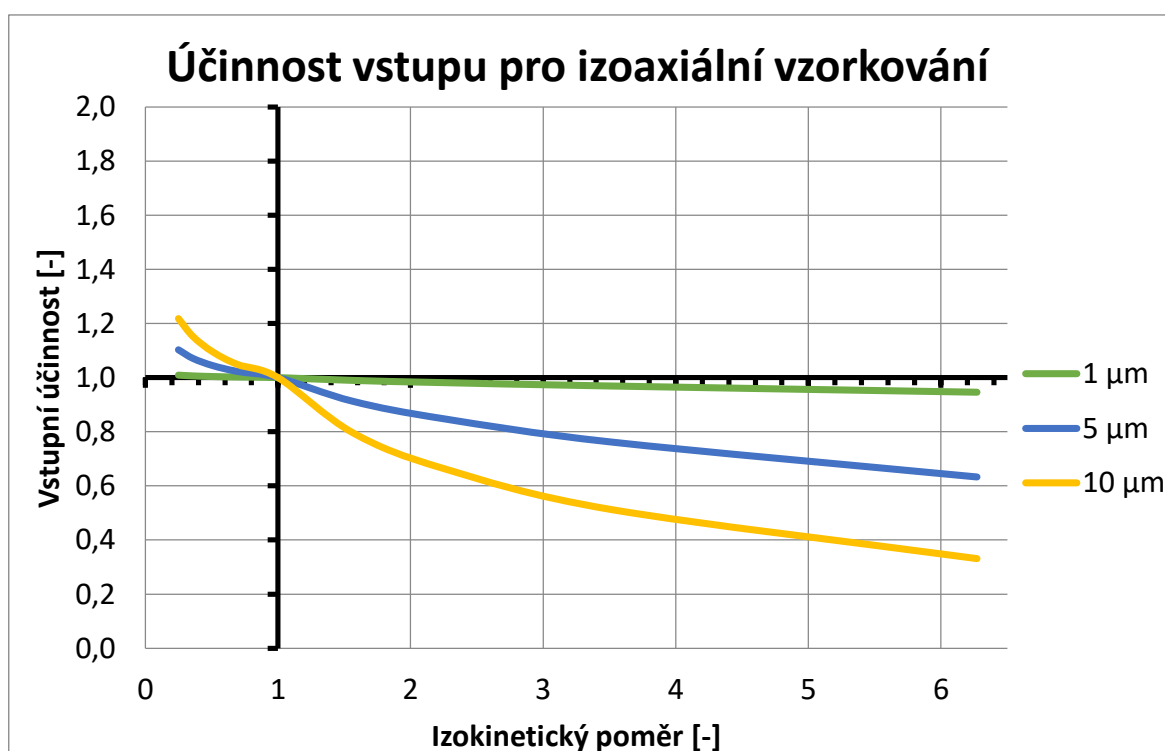
Graf 12 Účinnost aspirace pro izoaxiální vzorkování

Graf č. 1 zobrazuje typický průběh aspirační účinnosti, který vychází jak z teorie, tak z experimentů nebo matematických modelů. Čím větší a těžší částice, tím více jsou rozdílnými rychlostmi ovlivněny. Z toho poté vyplývají nepřesnosti měření koncentrace pevných částic v proudící vzdušině.

Účinnost odběru se však nadále výrazně mění z důvodu ztrát usazováním částic na vnitřní stěně odběrové hubice a v turbulentní oblasti vena contracta při přesávání (super-izokinetickém odběru). Hodnoty jsou vypsány v tabulce č. 12 a vykresleny v grafu č. 13.

	Aerodynamická velikost částic [μm]		
	1	5	10
Izokinetický poměr [-]	Účinnost vstupu částic [-]		
0,25	1,01	1,10	1,22
0,36	1,01	1,07	1,15
0,51	1,00	1,04	1,09
0,70	1,00	1,02	1,05
1,00	1,00	1,00	1,00
1,57	0,99	0,91	0,80
2,25	0,98	0,85	0,66
3,52	0,97	0,76	0,51
6,27	0,95	0,63	0,33

Tabulka 12 Účinnost vstupu částic pro izoaxiální vzorkování



Graf 13 Teoretická účinnost vstupu pro izoaxiální vzorkování

5.5. Teoretický výpočet anizoaxiálního odběru

Anizoaxiální odběr jsem experimentálně měřil pouze pro izokinetický odběr vzorku a v této kapitole jej srovnávám s teoretickým modelem. Výpočet je z části stejný, jako při izoaxiálním odběru v kapitole 5.4. Vstupní parametry (viz tabulku č. 10) a výpočty parametrů (korekční faktor skluzu C_c , doba relaxace částic τ a Stokesovo číslo Stk) jsou shodné. Příklad výpočtu uvádím pro $10\mu\text{m}$ částice, izokinetický odběr, který je zajištěn použitím 15mm hubice, a natočení hubice o úhel 15° . Postupuji podle kapitoly 3.3.2.

Účinnost aspirace částic je závislá na modifikovaném Stokesově čísle a úhlu θ mezi směrem proudění okolní vzdušiny a směrem proudění vzorkované vzdušiny.

$$Stk = \frac{U_0 \cdot \tau}{d} = \frac{3,61 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}}{0,015} = 7,61 \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$Stk' = Stk \cdot e^{0,022 \cdot \theta} = 8,69 \cdot 10^{-4} \cdot e^{0,022 \cdot 15} = 0,106 \quad [-]$$

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{U_0}{U} \cdot \cos \theta - 1 \right] \cdot \frac{1 - \left[1 + \left[2 + 0,617 \cdot \left(\frac{U_0}{U} \right) \right] Stk' \right]^{-1}}{1 - [1 + 2,617 \cdot Stk']^{-1}} \cdot \left[1 - [1 + 0,55 \cdot Stk' \cdot e^{0,25 Stk'}]^{-1} \right]$$

$$\eta_{asp} = 1 + \left[\frac{3,61}{3,61} \cdot \cos 15 - 1 \right] \cdot \frac{1 - \left[1 + \left[2 + 0,617 \cdot \left(\frac{3,61}{3,61} \right) \right] \cdot 0,0012 \right]^{-1}}{1 - [1 + 2,617 \cdot 0,0012]^{-1}} \cdot [1 - [1 + 0,55 \cdot 0,0012 \cdot e^{0,25 \cdot 0,0012}]^{-1}] = 0,9 \quad [-]$$

Ztráty gravitačním usazováním nejsou při vertikálním vzorkování přítomny. Ztrátový parametr ve *vena contracta* (rovnice č. 22) je v tomto případě roven nule, protože jde o izokinetické vzorkování. Mají zde tedy vliv pouze ztráty nárazem do vnitřní stěny hubice. Úhel θ se počítá s úhlem α , protože nárazy způsobují jak setrvačné síly, tak gravitační síly.

$$\alpha = 12 \cdot \left[\left(1 - \frac{\theta}{90} \right) - e^{-\theta} \right] = 12 \cdot \left[\left(1 - \frac{15}{90} \right) - e^{-15} \right] = 10 \quad [^\circ]$$

$$I_w = Stk \cdot \sqrt{\frac{U_0}{U}} \cdot \sin(\theta + \alpha) \cdot \sin\left(\frac{\theta + \alpha}{2}\right)$$

$$I_w = 7,61 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{3,61}{3,61}} \cdot \sin(15 + 10) \cdot \sin\left(\frac{15+10}{2}\right) = 0,0069 \quad [-]$$

Transmisní účinnost je tedy ovlivněna pouze ztrátami nárazem.

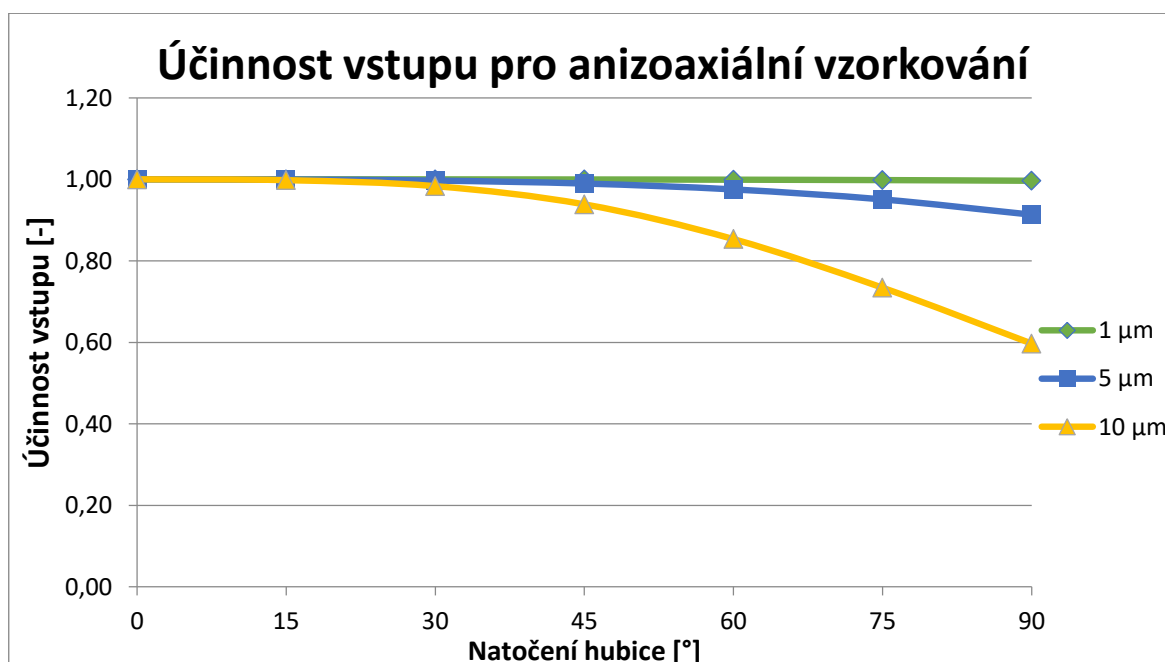
$$\eta_{trans,inert} = e^{-75 \cdot (I_v + I_w)^2} = e^{-75 \cdot (0 + 0,0048)^2} = 0,996 \quad [-]$$

Celková anizoaxiální účinnost vstupu částic odpovídá součinu účinnosti aspirace a účinnosti transmise podle rovnice č. 26. Výsledné hodnoty jsou sepsány v tabulce č. 13 a vykresleny v grafu č. 14.

$$\eta_{vstup}' = \eta_{asp} \cdot \eta_{trans,inert} = 0,9 \cdot 0,998 = 0,899 \quad [-]$$

	Aerodynamická velikost částic [μm]		
	1	5	10
Úhel odběru [-]	Účinnost vstupu částic [-]		
0	1,000	1,000	1,000
15	1,000	0,999	0,994
30	1,000	0,996	0,972
45	1,000	0,989	0,923
60	0,999	0,974	0,841
75	0,998	0,950	0,730
90	0,997	0,913	0,597

Tabulka 13 Účinnost vstupu částic pro anizoaxiální vzorkování



Graf 14 Teoretická účinnost vstupu při natočení hubice o úhel 0° až 90°

Z hodnot je patrné, že větší částice jsou s rostoucím úhlem natočení více ovlivněny než částice menší. Nejmenější částice teoreticky nejsou natočením ovlivněny téměř vůbec, protože vlivem setrvačnosti nevybočují z nasávaných proudnic vzdušiny.

6. Porovnání teoretických a experimentálních výsledků

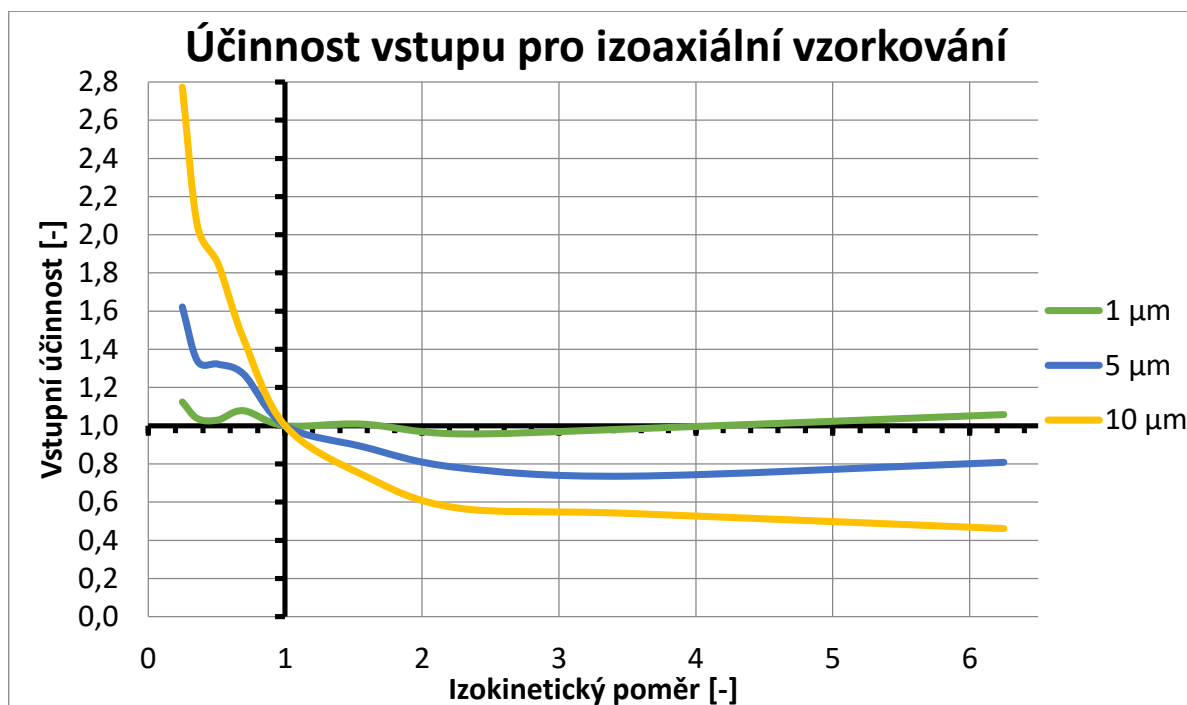
Pro porovnání výpočtů a experimentů používám data získané použitím hubic s tupou vstupní hranou, protože je považuji za více reprezentativní, co se týče jevů spojených s nedodržením izokinetických a izoaxiálních zásad vzorkování. V grafu č. 15 jsou vykresleny naměřené hodnoty vstupní účinnosti pro částice stejných velikostí, jako v teoretickém výpočtu (1 μm, 5 μm a 10 μm).

Na první pohled jsou grafy č. 15 a č. 13 velmi rozdílné hlavně v oblasti podsávání (sub-izokinetiky). Podle teorie by měly účinnosti vstupu být maximálně o 20 % větší, než při izokinetickém odběru, ale ve skutečnosti byly naměřeny mnohem větší hodnoty.

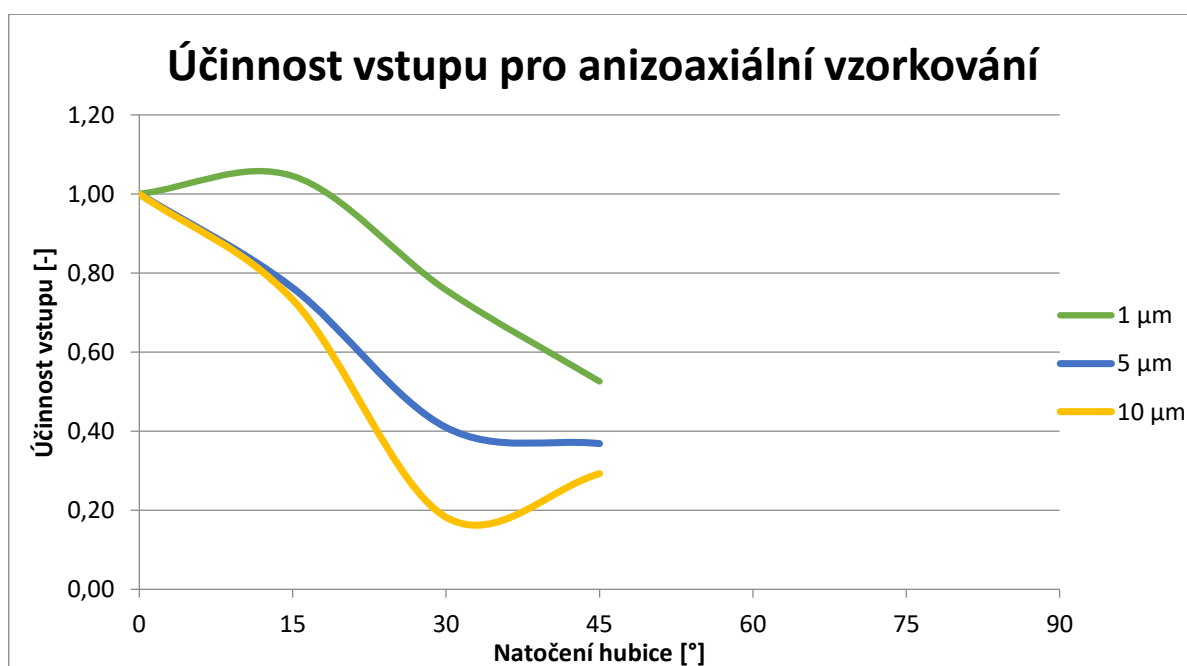
V oblasti přesávání experimenty přibližně odpovídají teorii. Malé částice se pohybují v blízkosti izokinetického odběru při všech režimech vzorkování, středně velké částice v rozmezí přibližně 60 až 80 % a velké částice v rozmezí 40 až 60 % referenčních hodnot. Lze tedy říci, že teoretické výpočty relativně odpovídají skutečným experimentům v oblasti přesávání. Z důvodu nepřesností a dalších vlivů na reálná měření však budou experimentálně stanovené hodnoty vždy různé od teoretických výpočtů.

Anizoaxiální izokinetické vzorkování má na malé, střední a velké částice velmi rozdílný vliv, než je dáno teorií. Podle teorie se koncentrace mají výrazně snižovat až přibližně při natočení o úhel 45° . Na malé částice kolem $1\ \mu\text{m}$ nemá natáčení mít prakticky žádný vliv. Ve skutečnosti jsou pozorovatelné výrazné změny již při natočení hubice o úhel 15° u všech velikostí částic. V grafu č. 16 jsou zobrazeny výsledky pro ostrou hubici, bohužel z důvodu fyzických možností prašné tratě pouze po úhel 45° .

Detailní srovnání naměřených a teoretických hodnot je v přílohách č. 7 a 8.



Graf 15 Naměřená vstupní účinnost při neizokinetických odběrech tupými hubicemi



Graf 16 Naměřená vstupní účinnost při anizoaxiálních odběrech tupými hubicemi

7. Návrh konstrukce izokinetického rozdělovače vzorku a odběrové hubice

Při návrhu obou součástí vzorkovací aparatury vycházím ze zkušeností a nastavených parametrů měření, v první řadě z konstantního průtoku vzorku přístrojem APS (viz tabulku č. 14).

Průtok vzdušiny do přístroje APS	$0,3 \text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{h}^{-1}$
Vnitřní průměr připojovací hadičky do APS	3,9 mm
Průtok vzdušiny vzorkovací sondou	$2,3 \text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{h}^{-1}$
Průtok vzdušiny prašnou tratí	$1000 \text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{h}^{-1}$
Vnitřní průměr prašné tratě	313 mm

Tabulka 14 Výchozí parametry pro návrh konstrukcí

Nejdůležitější je zachování izokinetického a izoaxiálního odběru jak z proudu vzdušiny v prašné trati, tak z proudu již odebraného vzorku do přístroje APS v rozdělovači vzorku. Odběrová trubička v rozdělovači musí mít vnější průměr 3,9 mm, aby na ni pasovala antistatická hubice se stejným vnitřním průměrem, která odvádí vzorek do vstupu přístroje APS. Dále vycházím z výpočtů izokinetických parametrů pro prašnou trať z kapitoly 4.4.

Navrhuji trubičku s tloušťkou stěny 0,5 mm a tedy vnitřním průměrem 2,9 mm. Přístroj APS tedy přes tento průřez bude nasávat vzorek s rychlostí $12,69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (viz rovnici č. 29). Pro stejnou rychlost uvnitř rozdělovače volím průtok $2,3 \text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{h}^{-1}$, který odpovídá 8 mm vnitřního průměru. Trubička je ohnuta o úhel 30° a je zavedena dovnitř rozdělovače tak, aby se její osa shodovala s osou rozdělovače. Čím je úhel zakřivení proudnic menší, tím méně dochází k tvorbě turbulencí v proudu vzdušiny. Z důvodu vyrobitelnosti a zároveň malého ovlivnění proudu volím právě úhel 30° . Trubička je po celém svém obvodu svařena k rozdělovači.

Odběrová trať má po celé své délce vnitřní průměr stejný jako rozdělovač, tedy 8 mm. Odběrová hubice na tento průměr musí navazovat. Pro zvolený průtok prašnou tratí $1000 \text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{h}^{-1}$ a vnitřní průměr prašné tratě 313 mm odpovídá rychlost proudění $3,61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Odběrová hubice musí tedy mít vstupní průměr pro průtok $2,3 \text{ m}^3_{\text{N}}\cdot\text{h}^{-1}$ roven 15 mm. Hubice bude mít tvar zužující se dýzy ve směru od vstupního průřezu. Vnější tvar hubice má opačný charakter a postupně se rozšiřuje, aby byl aerodynamicky obtékán okolní vzdušinou. Připojení hubice je provedeno pomocí vnějšího závitu M16 na spodní části hubice.

Výkresy konstrukcí jsou uvedeny v přílohách č. 9 a 10.

8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjištění vlivu nevhodně nastavených parametrů odběru vzorku znečištěné vzdušiny na výslednou koncentraci mikročástic o velikostech 1 μm až 10 μm . Velmi jemné mikročástice prachu nebo jiných pevných látek se ze znečištěného prostředí dostávají do respiračního systému člověka a trvale ohrožují jeho zdraví. Mimo jiné se také usazují se na rostlinách, dostávají se do vodních toků a ploch. Výsledky provedených experimentů mohou posloužit jako zdroj informací pro měření právě částic kategorií PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_1 .

Důležitým rozměrem částic při vzorkování z proudící vzdušiny je tzv. aerodynamický průměr, který vypovídá o vlastnostech částice ve vznosu. Koncentrace pevných částic v emisích energetických zdrojů je jedna z nejzákladnějších sledovaných charakteristik provozu. Je sledována hmotnostní koncentrace pevných částic v objemu vzdušiny. Její měření je důležité provést správně podle příslušných norem. Při nedodržení izokinetických a izoaxiálních zásad vzorkování dochází k velkým nepřesnostem měření, jenž se stává nereprezentativním. Tudíž rychlosti nasávaného vzorku a okolní proudící vzdušiny musí mít stejnou velikost a rovnoběžný směr. Byly provedeny zkoušky neizokinetických i neizoaxiálních odběrů vzorků uměle vytvořené znečištěné vzdušiny. Dávkovaným materiálem do proudícího vzduchu byl černouhelný popílek.

Neizokinetické odběry byly simulovány pomocí změny vstupního průřezu odběrové hubice, potažmo tedy odběrovou rychlostí, jelikož objemový průtok odběrovou trati musel být zachován. Tato metoda byla zvolena z toho důvodu, že měřicí přístroj APS nasává část vzorku z odběrové tratě s vestavěným konstantním průtokem. Při rozdělování vzorku musí být také splněna podmínka izokinetiky.

Neizokinetika byla testována pomocí sady hubic s tupou (zaoblenou) a ostrou vstupní hranou. Sady obou typů obsahují celkem 9 kusů hubic s velikostmi vstupních průměrů od 6 mm do 30 mm. Podle rovnice kontinuity byly vypočítány příslušné izokinetické poměry rychlostí pro všechny hubice. Těmto poměrům byla následně přiřazována naměřená data.

Obecně podle teorie má platit, že při přesávání (neboli izokinetickém poměru větším než 1) bude měřená koncentrace částic menší a při podsávání naopak větší. Měřením se tyto hypotézy při použití tupých hubic v podstatě potvrdily, nicméně u ostrých hubic se vyskytlo několik nestandardních jevů. Při přesávání se poměrné koncentrace částic zastavily na nejnižších hodnotách při izokinetickém poměru 2,25 a při dalším zvyšování odběrové rychlosti se opět zvyšovaly. Naopak při podsávání byly u totožného, ale opačného poměru rychlostí naměřeny vyšší koncentrace, než u poměru 0,36. Je možné, že ostrá hrana hubice ovlivňuje nasávané proudnice jiným způsobem, než tupá hrana. V tomto důsledku, a v konkrétní aplikaci na dané prašné trati, byly zaznamenány nesrovnalosti s teoretickým základem. Jistou informací však je, že ostrohranné hubice dosahovaly při stejných podmínkách obecně větších výchylek koncentrace.

Izoaxiálnost, neboli rovnoběžnost osy hubice a osy potrubí, kterým proudí sledovaná vzdušina, je další velmi důležitý parametr vzorkování. Natačením hubice ve směru normály na vektor proudění vzdušiny při izokinetickém odběru jsem zjistil velmi výrazné změny v naměřených koncentracích částic. Otočením ostré hubice již o úhel 15° se koncentrace částic větších než $4\text{ }\mu\text{m}$ zmenšily až o 30 %. Menší částice byly rovněž značně ovlivněny. Dalším zvětšením úhlu se koncentrace v celém sledovaném spektru částic dále snižovaly. Výsledky pro natočení tupé hubice o 15° nejsou zcela jednoznačné. Koncentrace kolísají kolem normální hodnoty při různých velikostech částic. Je možné, že tupá hrana při mírném natočení zcela nenarušuje nasávané proudnice. V případě obou typů hubic jsou výsledky měření při natočení o 30° a 45° na velmi podobných nízkých hodnotách, protože byl vzorek odebrán z krajních vrstev proudící vzdušiny u vnitřní stěny potrubí (při úhlu 47° se již hubice dotýkala stěny). Kdyby prašná trať měla o něco větší rozměr, pravděpodobně by byly výsledky pro úhel 45° na nejnižších hodnotách.

Výsledky byly nakonec porovnány s teoretickými výpočty účinnosti vstupu částic při stejných podmínkách jako v praktickém měření. K porovnání byly vybrány výsledky měření pro tupé hubice, jelikož se zdají být reprezentativnějším zdrojem informací pro sledované vlivy. U izoaxiálních odběrů se v oblasti přesávání výsledky téměř shodují, ale v oblasti podsávání byly naměřeny mnohem vyšší hodnoty. Z toho lze usoudit, že teoretické výpočty zdaleka nezohledňují veškeré vlivy na nasávané částice a pravděpodobně tedy nejsou platné v celém deklarovaném rozsahu použitelnosti (například pro poměr rychlostí $0,2 \leq U_0/U \leq 5$). V případě výpočtů neizoaxiálních vlivů velmi malé částice s velikostí okolo $1\text{ }\mu\text{m}$ nemají být téměř vůbec ovlivněny ani při kolmém směru (90°) odsávání vzorku na směr proudění vzdušiny. Z teoretického hlediska to dává smysl, jelikož malé částice nemají tak velkou setrvačnost, aby se z nasávaných proudnic odklonily. V praxi byla tato hypotéza měřením vyvrácena. Pro všechny sledované velikosti částic se mají účinnosti vstupu výrazněji snižovat (v řádu pouze několika %) až při úhlu natočení 45° , což bylo měřením také vyvráceno.

Pro prašnou trať byl také vytvořen návrh konstrukce rozdělovače vzorku pro přístroj APS a odběrovou hubici. Při návrhu jsem vycházel z izokinetických parametrů provedených měření. Byly vypočítány potřebné rozměry součástí a následně vytvořeny konstrukční výkresy.

9. Seznam zdrojů

- [1] TSI. 2019. Přístroj APS. [online]. [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: <https://www.tsi.com/aerodynamic-particle-sizer-spectrometer-3321/>
- [2] PRAŽNIKAR, Z. and J. PRAŽNIKAR. 2012. The effects of particulate matter air pollution on respiratory health and on the cardiovascular system. *Slovenian Journal of Public Health* 51(3). DOI: 10.2478/v10152-012- 0022-z. ISSN 1854-2476
- [3] ČHMÚ. Suspendované částice. [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Znecisteni/susp_castice.pdf
- [4] GUERREIRO, C. *et al.* 2018. Air quality in Europe — 2018 report. *Publications Office of the European Union*. ISBN: 978-92-9213-990-2
- [5] QIAN, J., A. R. FERRO, and K. R. FOWLER. 2012. Estimating the Resuspension Rate and Residence Time of Indoor Particles. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58(4), 502-516. DOI: 10.3155/1047-3289.58.4.502
- [6] WENGER, J. 2015. Urban and Rural Sources of Particulate Matter. Slideshare [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/EPAIreland/urban-and-rural-sources-of-particulate-matter>
- [7] WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2003. Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf
- [8] PABST, W. and E. GREGOROVÁ. 2007. Charakterizace částic a částicových soustav. *VŠCHT*, 109 s. [online]. [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/keramika/Characterization_of_particles/CPPS%20_Czech%20version_.pdf
- [9] MALVERN PANALYTICAL. 2018. Particle size. [online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/measurement-type/particle-size/index.html>
- [10] SYMPATEC GMBH. 2017. Laser Diffraction. [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/>
- [11] DELFT SOLIDS SOLUTIONS. Particle size analysis by gravitational sedimentation analysis. [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.solids-solutions.com/rd/particle-sizing-and-particle-size-analysis/particle-size-analysis-by-gravitational-sedimentation-analysis>
- [12] KRPEC, K. 2011. Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. *Český instalatér*, 4. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [13] OCHODEK, T. 2002. Technik měření emisí. *VŠB - TU Ostrava*. 198 pp. ISBN 80-248-0156-6.

- [14] KELEMEN, M. and MAŤAŠOVSKÁ, T. 2006. Meranie hmotnostnej koncentrácie a bilancia úletu tuhých znečisťujúcich látok. [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2006_2/plus18_22.pdf
- [15] ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu – Část 1: Manuální gravimetrická metoda
- [16] TSI. Aerodynamic Particle Sizer Model 3321 Spec Sheet. [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.tsi.com/getmedia/7fd20aa0-8540-4b8d-8572-d164366dd08c/3321-Spec-Sheet-US?ext=.pdf>
- [17] BARON, P. A., P. KULKARNI, and K. WILLEKE. 2011. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications. 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 883 pp. ISBN: 9780470387412.
- [18] GRINSHUPUN, S. A., G. N. LIPATOV, and A. G. SUTUGIN. 1990. Sampling errors in cylindrical nozzles. *Aerosol Sci. Technol.* 12:716–740. DOI: 10.1080/02786829008959387
- [19] OKAZAKI, K., R. W. WIENER, and K. WILLEKE. 1987. Isoaxial aerosol sampling: nondimensional representation of overall sampling efficiency. *Environ. Sci. Technol.* 21(2):178–182. DOI: 10.1021/es00156a007
- [20] WIENER, R. K., K. OKAZAKI, and K. WILLEKE. 1988. Influence of turbulence on aerosol sampling efficiency. *Atmos. Environ.* 22(5):917–928. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90269-7
- [21] LIU, B. Y. H., Z. Q. ZHANG, and T. H. KUEHN. 1989. A numerical study of inertial errors in anisokinetic sampling. *J. Aerosol Sci.* 20(3):367–380. DOI: 10.1016/0021-8502(89)90012-8
- [22] HANGAL, S., and K. WILLEKE. 1990. Overall efficiency of tubular inlets sampling at 0–90 degrees from horizontal aerosol flows. *Atmos. Environ.* 24A(9):2379–2386. DOI: 10.1016/0960-1686(90)90330-P
- [23] BELYAEV, S. P., and L. M. LEVIN. 1972. Investigation of aerosol aspiration by photographing particle tracks under flash illumination. *J. Aerosol Sci.* 3:127–140. DOI: 10.1016/0021-8502(72)90149-8
- [24] BELYAEV, S. P., and L. M. LEVIN. 1974. Techniques for collection of representative aerosol samples. *J. Aerosol Sci.* 5:325–338. DOI: 10.1016/0021-8502(74)90130-X
- [25] RADER, D. J., and V. A. MARPLE. 1988. A study of the effect of anisokinetic sampling. *Aerosol Sci. Technol.* 8(3):283–299. DOI: 10.1080/02786828808959190
- [26] ZHANG, Z. Q., and B. Y. H. LIU. 1989. On the empirical fitting equations for aspiration coefficients for thin-walled sampling probes. *J. Aerosol Sci.* 20(6):713–720. DOI: 10.1016/0021-8502(89)90060-8
- [27] OKAZAKI, K., R. W. WIENER, and K. WILLEKE. 1987. The combined effect of aspiration and transmission on aerosol sampling accuracy for horizontal isoaxial sampling. *Atmos. Environ.* 21(5):1181–1185. DOI: 10.1016/0004-6981(87)90245-9
- [28] SCHLICHTING, H. 2017. Boundary Layer Theory. 6 ed. New York: McGraw-Hill. 800 pp. ISBN: 978-3-662-52917-1.

- [29] YAMANO, N., and J. E. BROCKMANN. 1989. Aerosol Sampling and Transport Efficiency Calculation (ASTEC) and Application to Surtsey/DCH Aerosol Sampling System, NUREG/CR-525. SAND88-1447. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- [30] HANGAL, S., and K. WILLEKE. 1990. Aspiration efficiency: Unified model for all forward sampling angles. *Environ. Sci. Technol.* 24:688–691. DOI: 10.1021/es00075a012
- [31] DURHAM, M. D., and D. A. LUNDGREN. 1980. Evaluation of aerosol aspiration efficiency as a function of Stokes number, velocity ratio and nozzle angle. *J. Aerosol Sci.* 11:179–188. DOI: 10.1016/0021-8502(80)90033-6
- [32] TSI. 2019. Aerodynamic Particle Sizer Model 3321 - Theory of Operation. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.tsi.com/getmedia/26cd9e57-9050-4a57-a442-3ec3a4338808/3321%20Operation%20brochure%20A4-5001469_WEB?ext=.pdf
- [33] BRONKHORST. 2019. Mass-view MV-308. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.bronkhorst.com/int/products/gas-flow/mass-view/mv-308/>
- [34] BUSCH. 2019. Seco SV 1008 C. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.buschvacuum.com/cz/cs/products/seco/seco-sv/seco-sv-1008-c>
- [35] MIKUŠKA, P. 2013. Atmosférické aerosoly. [online] [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C5150/um/6_Mikuska_Aerosoly_2013.pdf

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 Typické poměry složek v městském prachu [3].....	10
Obrázek 2 Složení pevných částic [4].....	11
Obrázek 3 Podíl jednotlivých sektorů na množství PM ₁₀ a PM _{2,5} [4]	12
Obrázek 4 Dýchací ústrojí a tuhé částice [2]	13
Obrázek 5 Znázornění Feretova průměru a gratikulárního kruhu	14
Obrázek 6 Schéma zapojení gravimetrické metody [12].....	16
Obrázek 7 Laserová difrakce [10]	17
Obrázek 8 Schéma aerodynamického spektrometru [32].....	17
Obrázek 9 Schéma impaktoru [35]	18
Obrázek 10 Rozmístění vzorkovacích bodů v kruhovém potrubí [13].....	20
Obrázek 11 Schéma umístění průřezu měření [15]	21
Obrázek 12 Schéma izoaxiálních režimů vzorkování vzdušiny [17]	24
Obrázek 13 Účinnost aspirace při izoaxiálním odběru [17]	26
Obrázek 14 Transmisní účinnost při izoaxiálním odběru	29
Obrázek 15 Vstupní účinnost při izoaxiálním odběru	29
Obrázek 16 Schéma anizoaxiálních režimů vzorkování vzdušiny [17].....	30
Obrázek 17 Účinnost aspirace při anizoaxiálním odběru	32
Obrázek 18 Transmisní účinnost při anizoaxiálním odběru [17]	33
Obrázek 19 Vstupní účinnost při anizoaxiálním odběru [17].....	34
Obrázek 20 Schéma připojení měřící aparatury [Autor]	36

Obrázek 21 Průřez jednoduché hubice sondy [15]	37
Obrázek 22 Odběr vzorku pro měření [Autor]	37
Obrázek 23 Přístroj APS model 3321 [1]	38
Obrázek 24 Ukázka softwaru Aerosol Instrument Manager [16]	39
Obrázek 25 Průtokoměr MV-308 [33].....	40
Obrázek 26 Vývěva Seco SV 1008 C [34]	40
Obrázek 27 Schéma kompletní měřicí tratě [Autor].....	41
Obrázek 28 Přímé zapojení podavače prášku k trati [Autor].....	42
Obrázek 29 Umístění podavače prášku [Autor]	43
Obrázek 30 Redukce podávání prášku [Autor].....	43
Obrázek 31 Upevnění výstupu z podavače prášku [Autor]	44
Obrázek 32 Podavač prášku [Autor].....	45
Obrázek 33 Podávací válec [Autor]	45
Obrázek 34 Podávací válec [Autor]	45
Obrázek 35 Ostrá a tupá hubice [Autor]	47
Obrázek 36 Sada hubic s ostrou hranou, zprava od 6 mm do 30 mm [Autor]	47
Obrázek 37 Natočení hubice	48
Obrázek 38 Vyrovnávací plech [Autor].....	48
Obrázek 39 Natočení hubice o 15° [Autor]	48
Obrázek 40 Schéma průtokových veličin [autor]	49

11. Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1 Minimální počet vzorkovacích bodů v kruhovém potrubí [13]	20
Tabulka 2 Minimální počet vzorkovacích bodů v čtvercovém potrubí [13]	20
Tabulka 3 Parametry spektrometru APS 3321 [16].....	38
Tabulka 4 Provozní parametry průtokoměru MV-308 [33].....	39
Tabulka 5 Parametry vývěvy Seco SV 1008 C [34]	40
Tabulka 6 Rychlosti v odběrových hubicích a izokinetické poměry rychlostí.....	51
Tabulka 7 Kanály APS o velikosti přibližně 1 μm	53
Tabulka 8 Poměry naměřených koncentrací při izoaxiálních odběrech tupými hubicemi ..	54
Tabulka 9 Poměry naměřených koncentrací při izoaxiálních odběrech ostrými hubicemi ..	57
Tabulka 10 Zvolené výpočetní parametry	63
Tabulka 11 Účinnost aspirace částic pro izoaxiální vzorkování.....	65
Tabulka 12 Účinnost vstupu částic pro izoaxiální vzorkování	66
Tabulka 13 Účinnost vstupu částic pro anizoaxiální vzorkování	67
Tabulka 14 Výchozí parametry pro návrh konstrukcí	70

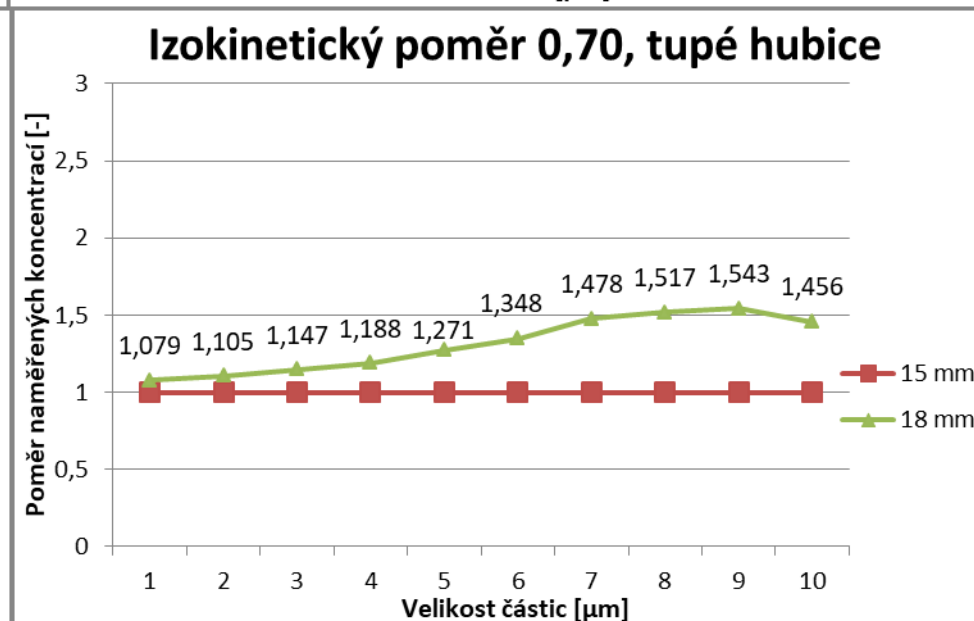
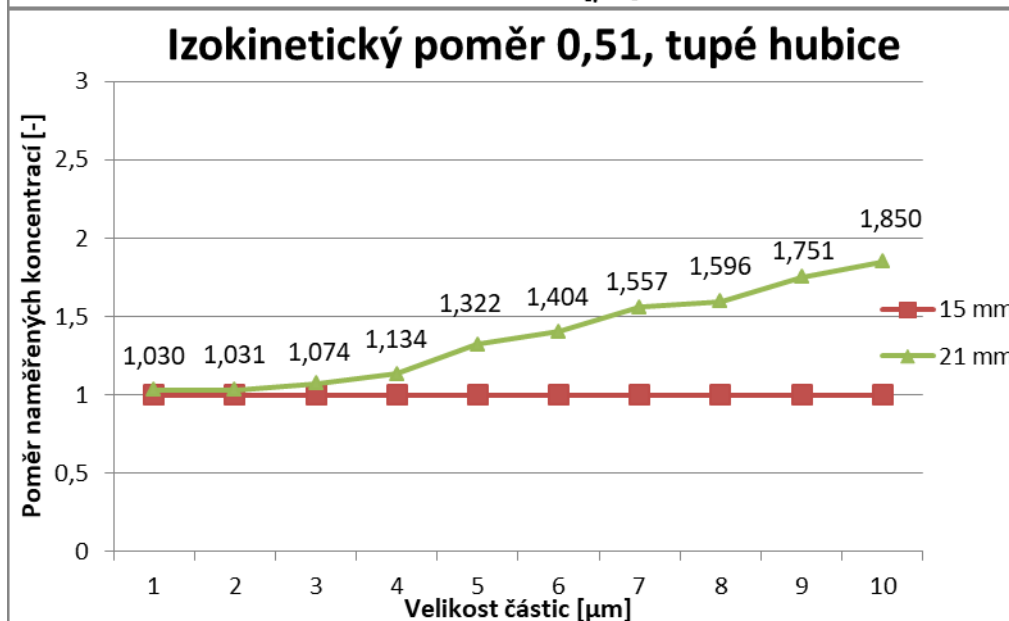
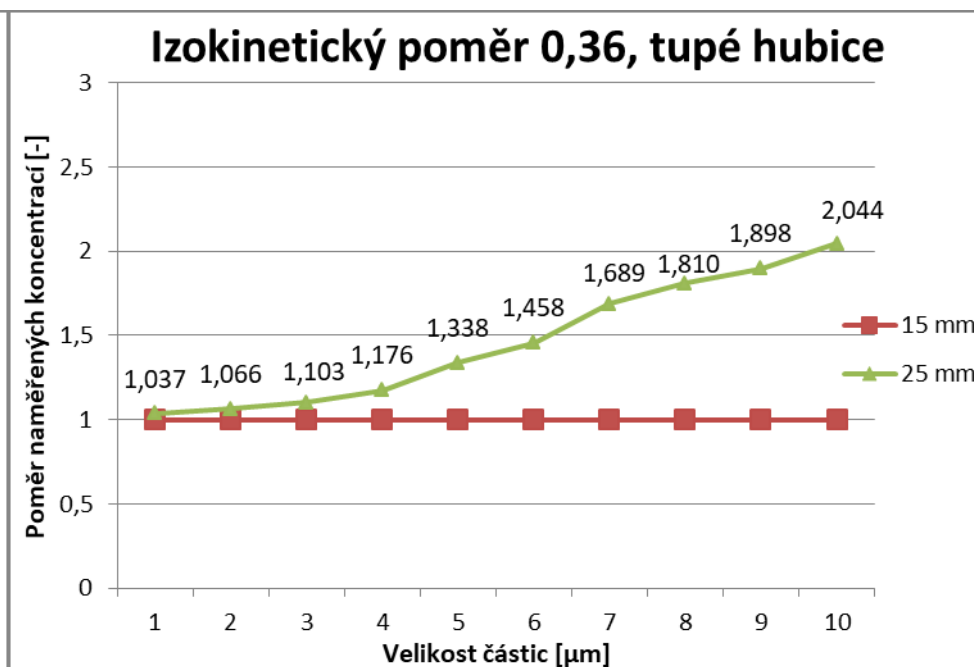
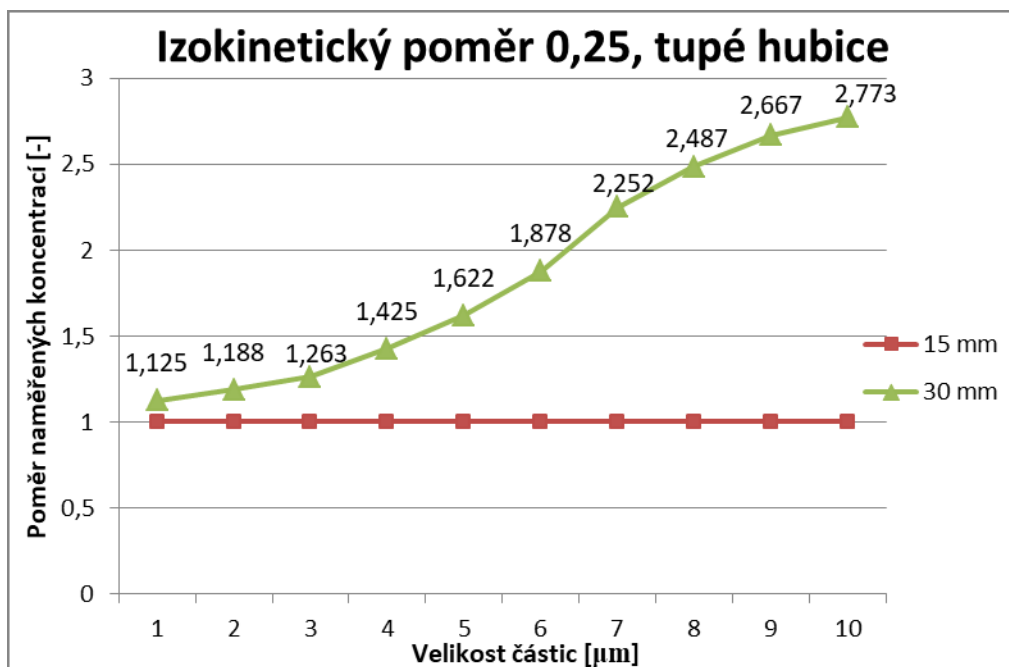
Graf 1 Koncentrace pevných částic v popílku	52
Graf 2 Porovnání naměřených koncentrací při izokinetickém poměru 1,56	55
Graf 3 Souhrn super-izokinetických odběrů tupými hubicemi	56
Graf 4 Souhrn sub-izokinetických odběrů tupými hubicemi	56
Graf 5 Porovnání naměřených koncentrací při izokinetickém poměru 1,56	57
Graf 6 Souhrn super-izokinetických odběrů ostrými hubicemi	58
Graf 7 Souhrn sub-izokinetických odběrů ostrými hubicemi	59
Graf 8 Souhrn neizokinetických odběrů ostrými hubicemi; částice 4 - 8 μm	60
Graf 9 Souhrn anizoaxiálních odběrů tupou hubicí	61
Graf 10 Souhrn anizoaxiálních odběrů ostrou hubicí	61
Graf 11 Porovnání naměřených koncentrací mezi 15mm tupou a 15mm ostrou hubicí	62
Graf 12 Účinnost aspirace pro izoaxiální vzorkování	65
Graf 13 Teoretická účinnost vstupu pro izoaxiální vzorkování	66
Graf 14 Teoretická účinnost vstupu při natočení hubice o úhel 0° až 90°	68
Graf 15 Naměřená vstupní účinnost při neizokinetických odběrech tupými hubicemi	69
Graf 16 Naměřená vstupní účinnost při anizoaxiálních odběrech tupými hubicemi	69

12. Seznam příloh

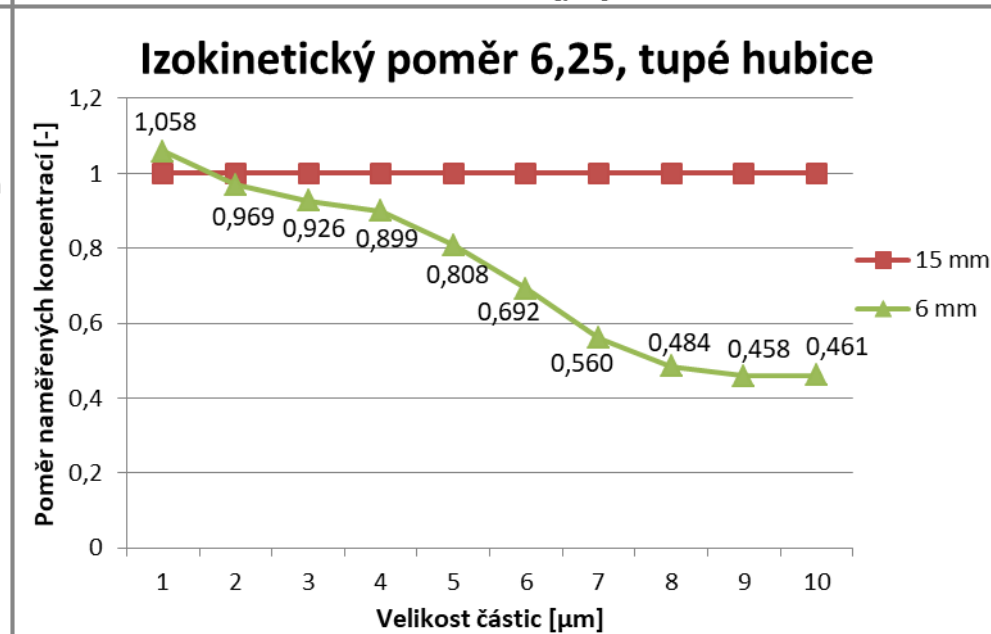
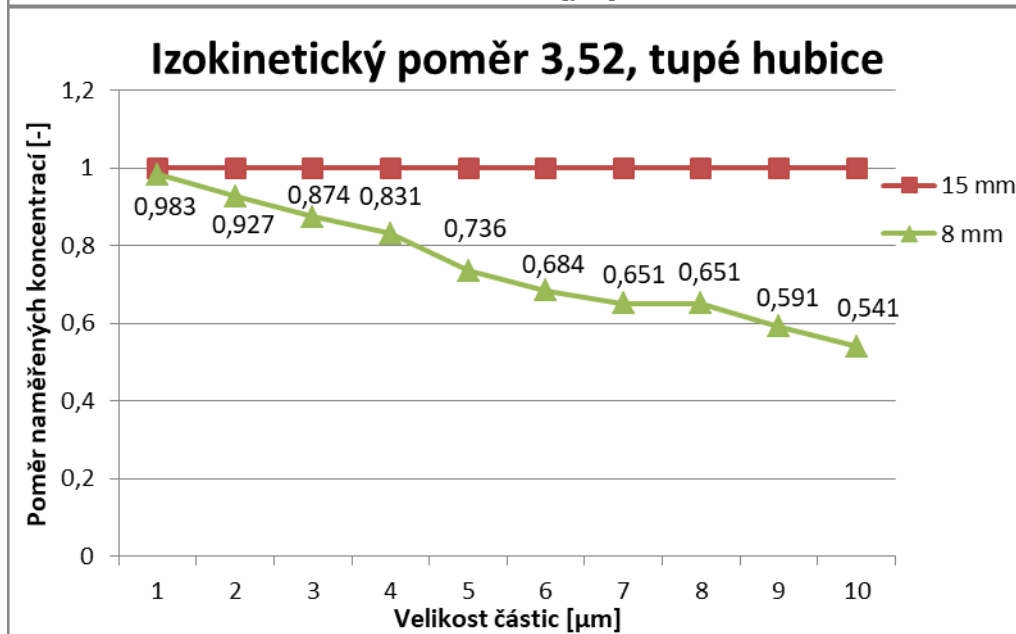
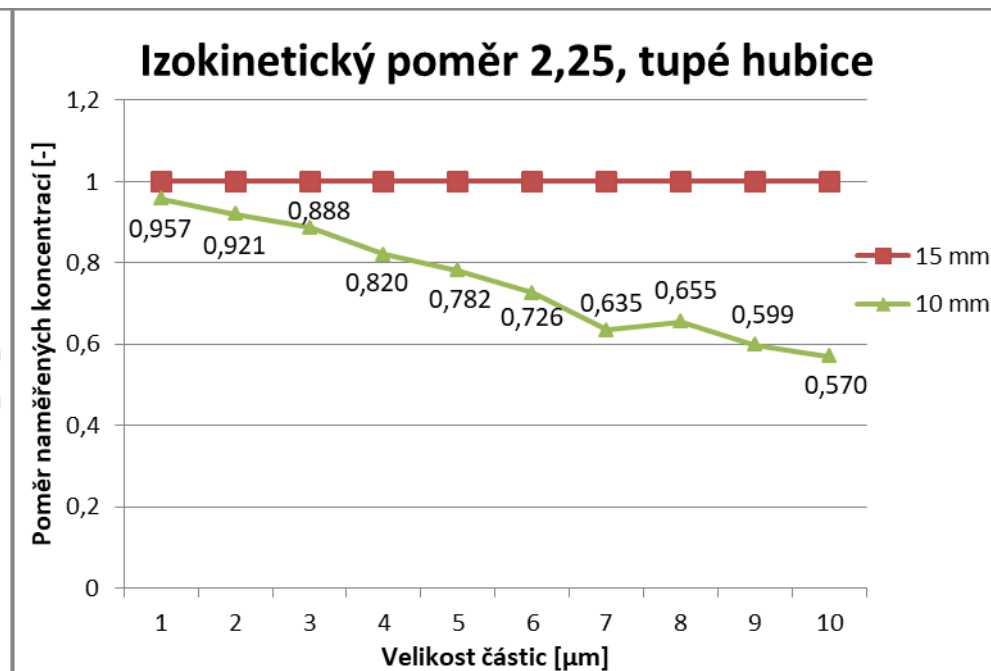
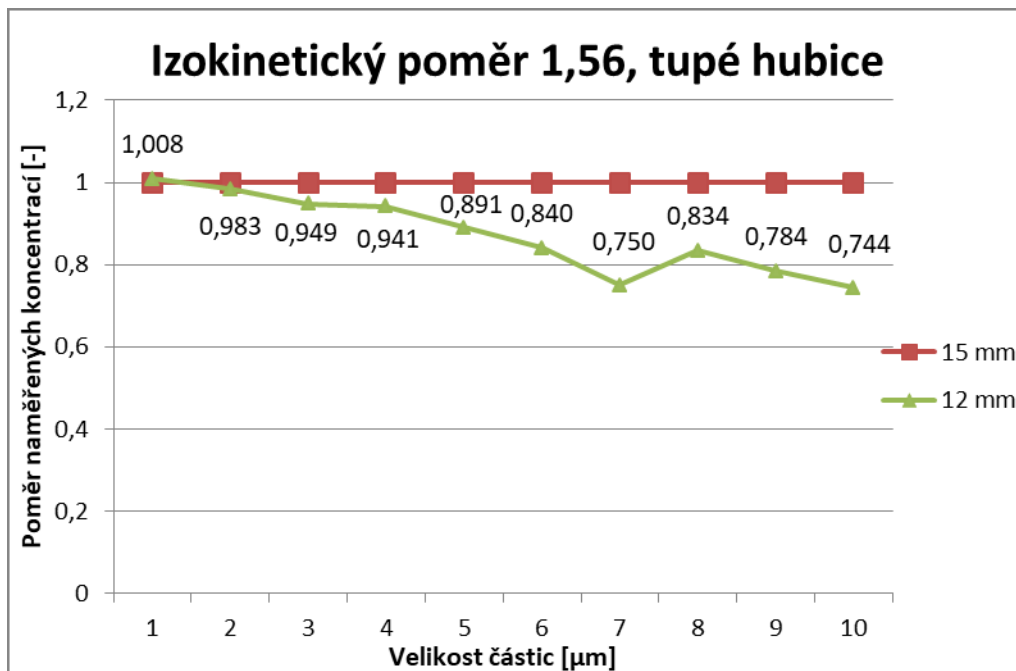
- Příloha 1: Sub-izokinetické odběry tupými hubicemi
- Příloha 2: Super-izokinetické odběry tupými hubicemi
- Příloha 3: Anizoaxiální odběry tupými hubicemi
- Příloha 4: Sub-izokinetické odběry ostrými hubicemi
- Příloha 5: Super-izokinetické odběry ostrými hubicemi
- Příloha 6: Anizoaxiální odběry ostrými hubicemi
- Příloha 7: Srovnání naměřených a teoretických neizokinetických dat
- Příloha 8: Srovnání naměřených a teoretických anizoaxiálních dat
- Příloha 9: Výkres rozdělovače vzorku
- Příloha 10: Výkres odběrové hubice

13. Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis	Jednotka
APS	Aerodynamic Particle Sizer	[-]
AIM	Aerosol Instrument Manager	[-]
c	Početní koncentrace	$[\text{N.cm}^{-3}]$
C_c	Korekční faktor skluzu	[-]
d, D	Průměr	[m]
g	Tíhové zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
I_v	Ztrátový parametr <i>vena contracta</i>	[-]
I_w	Ztrátový parametr nárazem	[-]
L	Délka hubice	[m]
p	Tlak	[Pa]
PM	Particulate matter	[-]
R	Poměr stran částice	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	Vnitřní průřez potrubí	$[\text{m}^2]$
Stk	Stokesovo korekční číslo	[-]
T	Teplota	[K]
TZL	Tuhé znečišťující látky	[-]
U	Rychlost proudění	$[\text{m.s}^{-1}]$
\dot{V}	Objemový průtok vzdušiny	$[\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$
x	Poměr koncentrací	[-]
Z	Ztrátový gravitační parametr	[-]
α	Gravitační parametr pro náraz částic	$[\text{°}]$
η	Účinnost	[-]
θ	Úhel vzorkování	$[\text{°}]$
ν	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
ρ	Hustota	$[\text{kg.m}^{-3}]$
τ	Doba relaxace částic	[s]
ω	Izokinetický poměr rychlostí	[-]

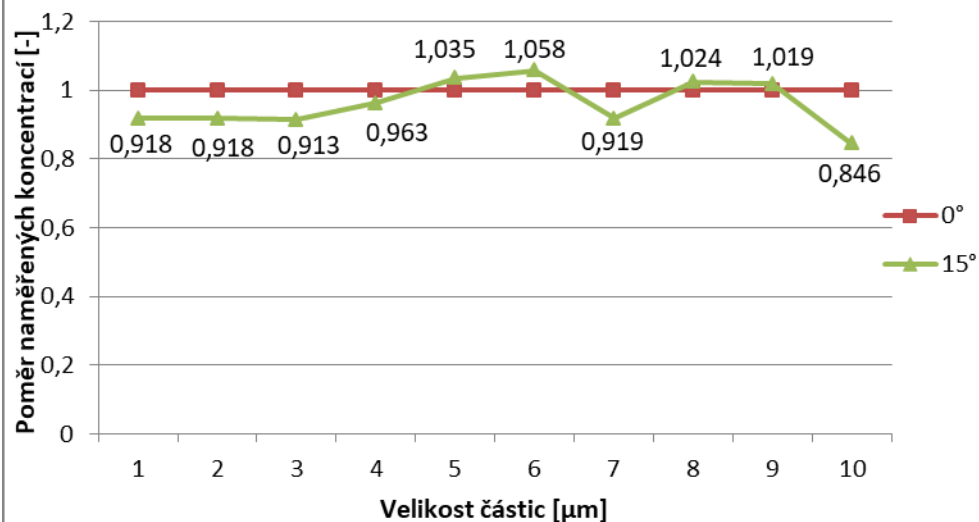


Příloha 1: Sub-izokinetické odběry tupými hubicemi

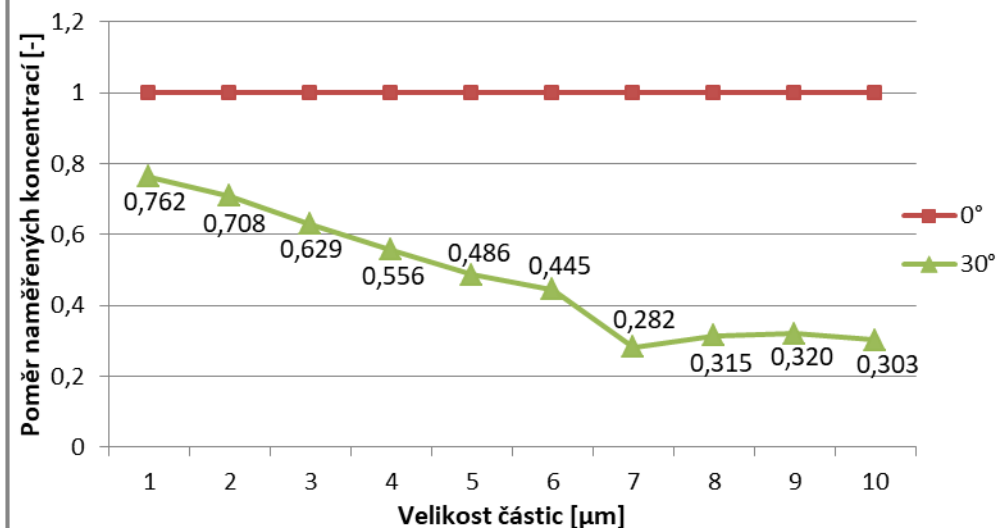


Příloha 2: Super-izokinetické odběry tupými hubicemi

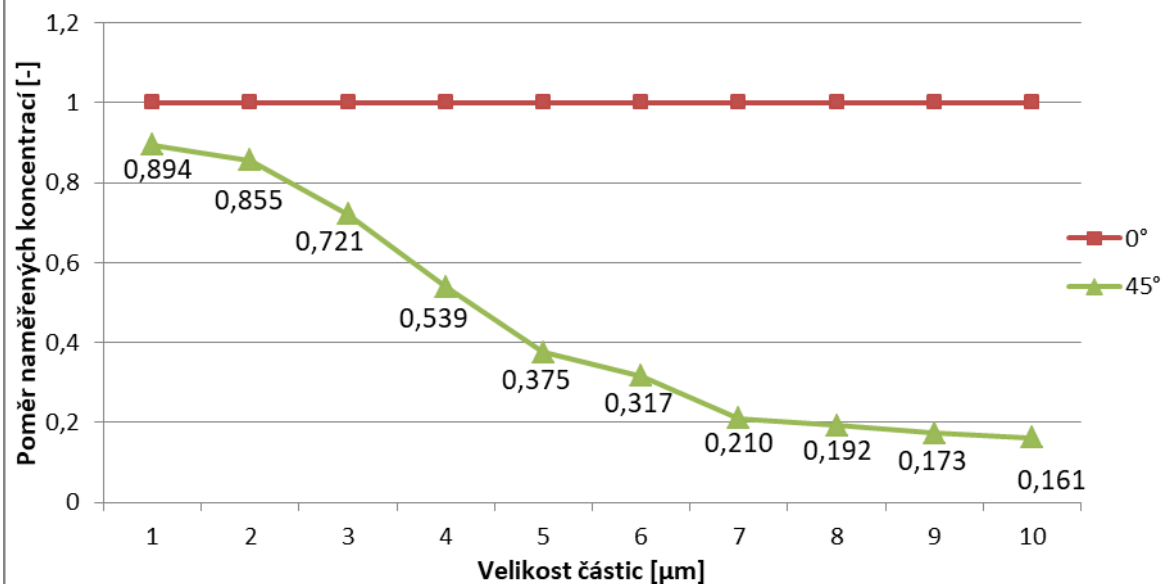
Sklon o úhel 15°, tupá hubice

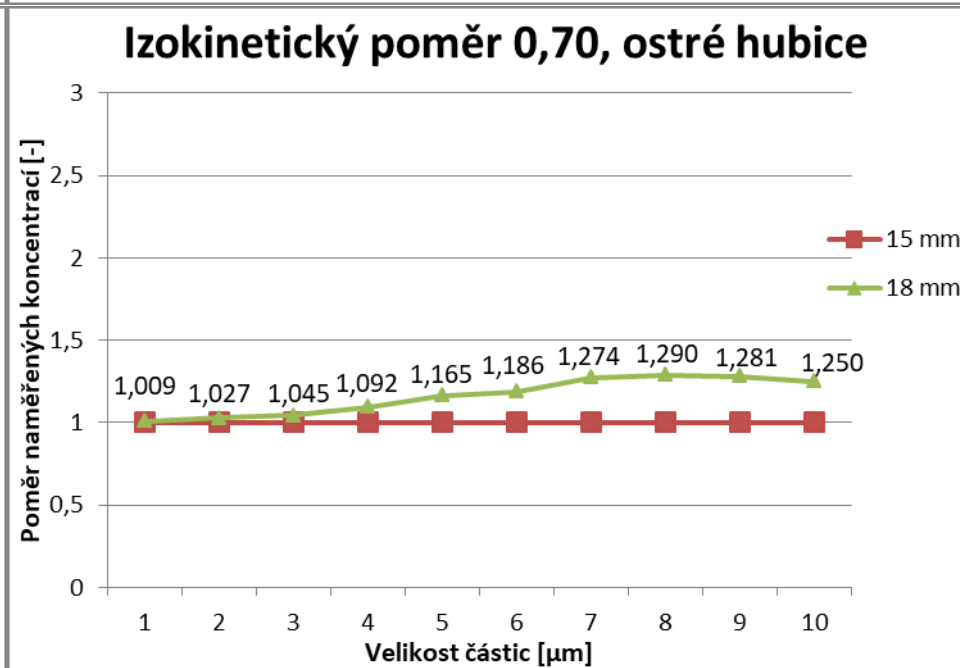
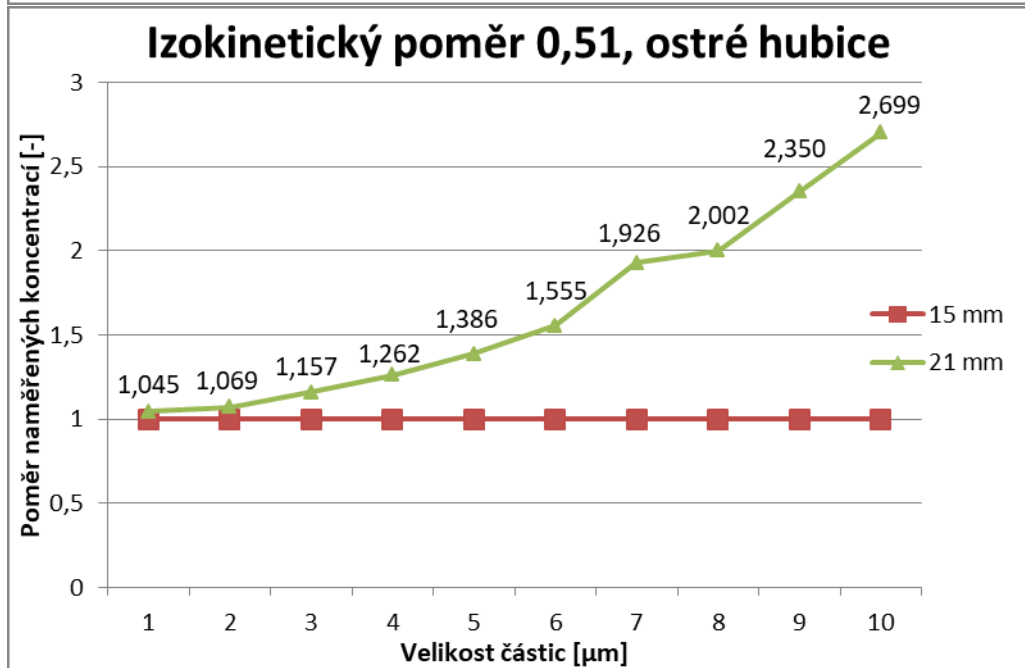
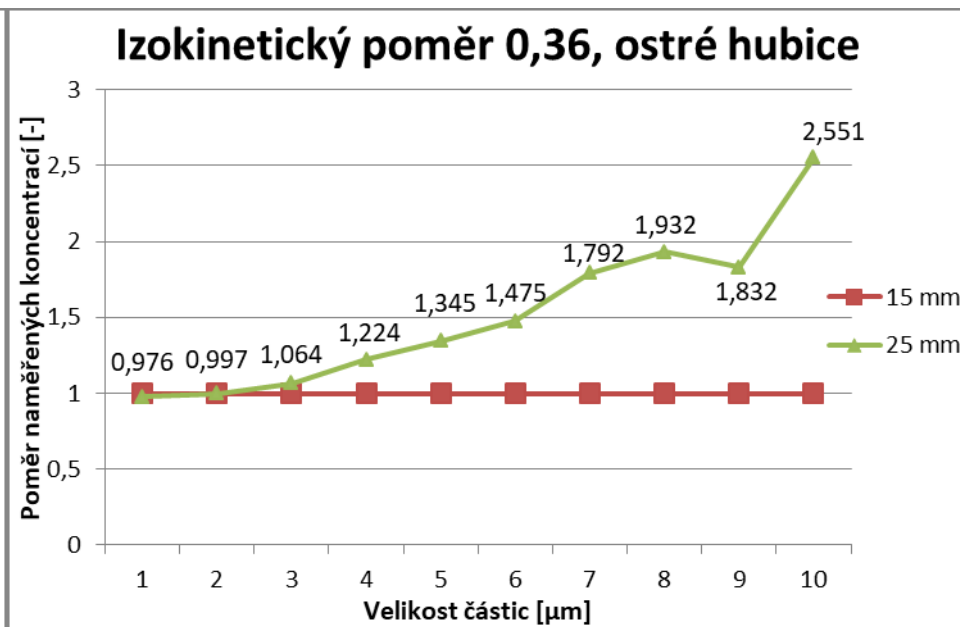
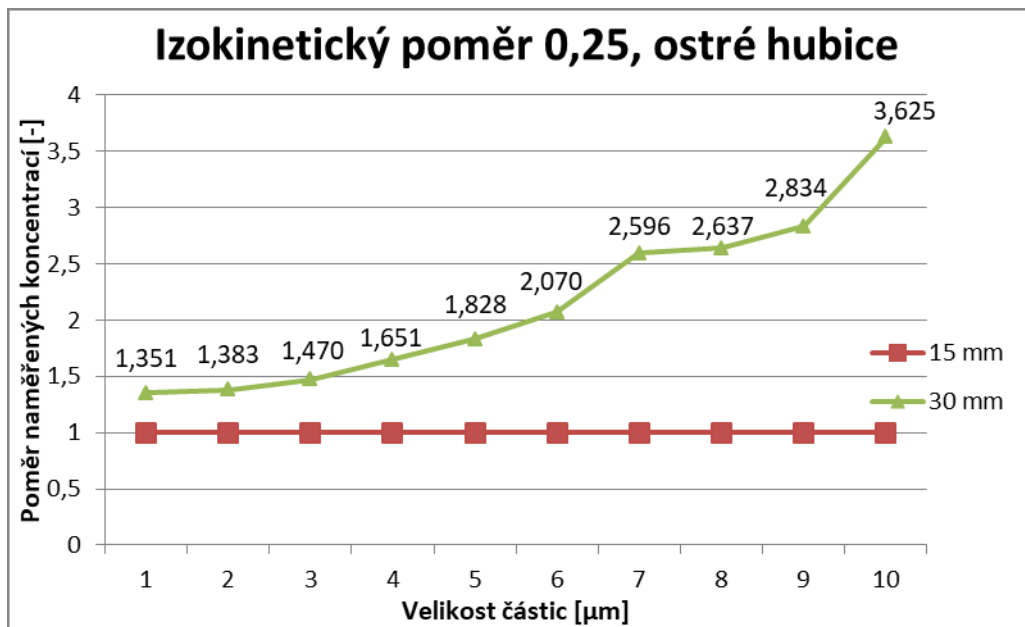


Sklon o úhel 30°, tupá hubice

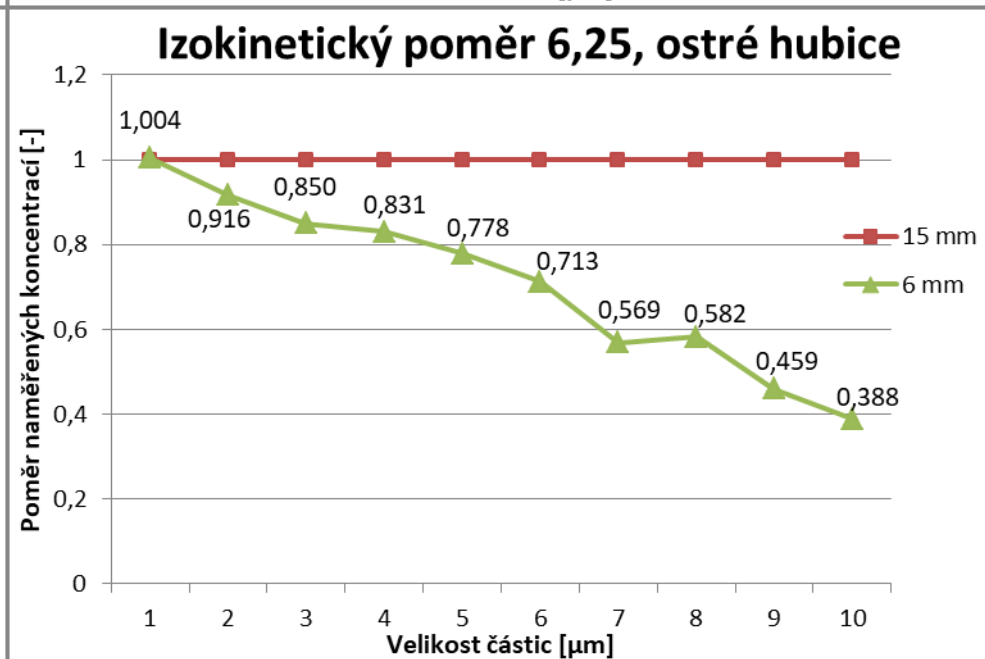
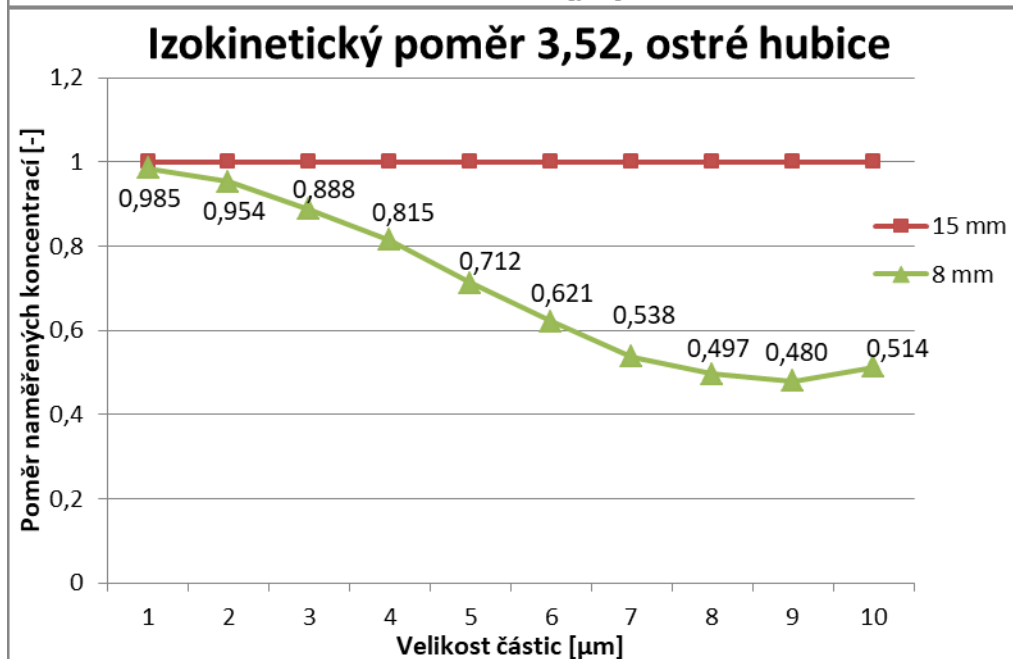
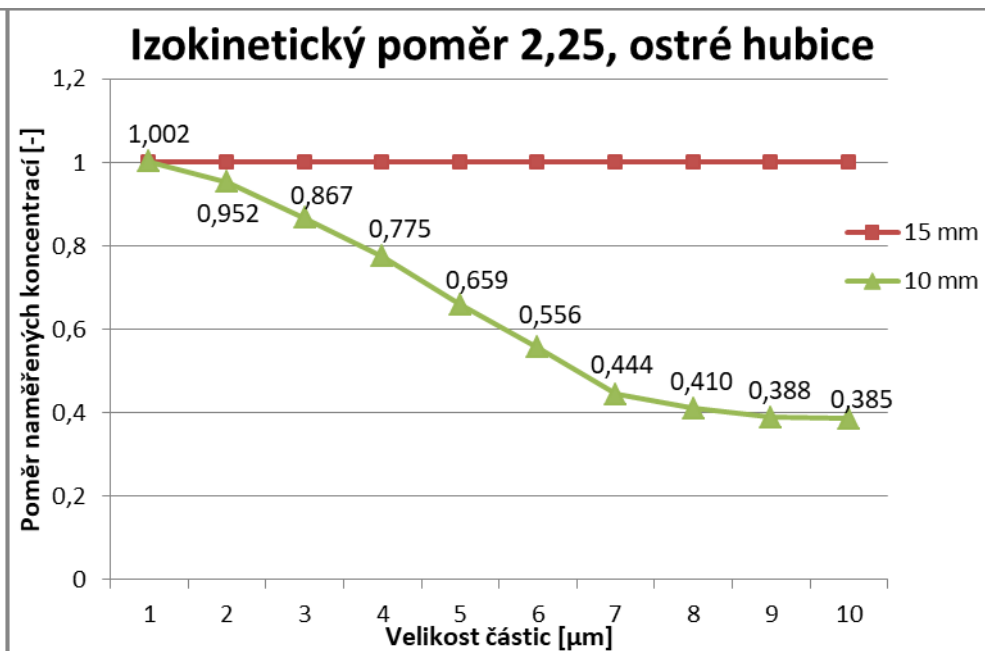
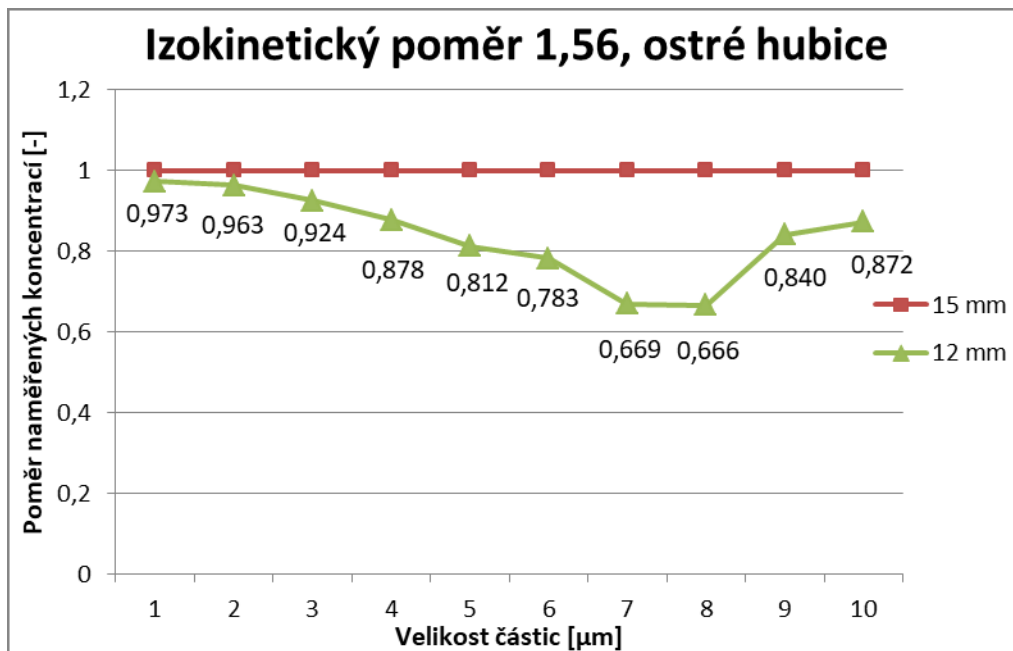


Sklon o úhel 45°, tupá hubice

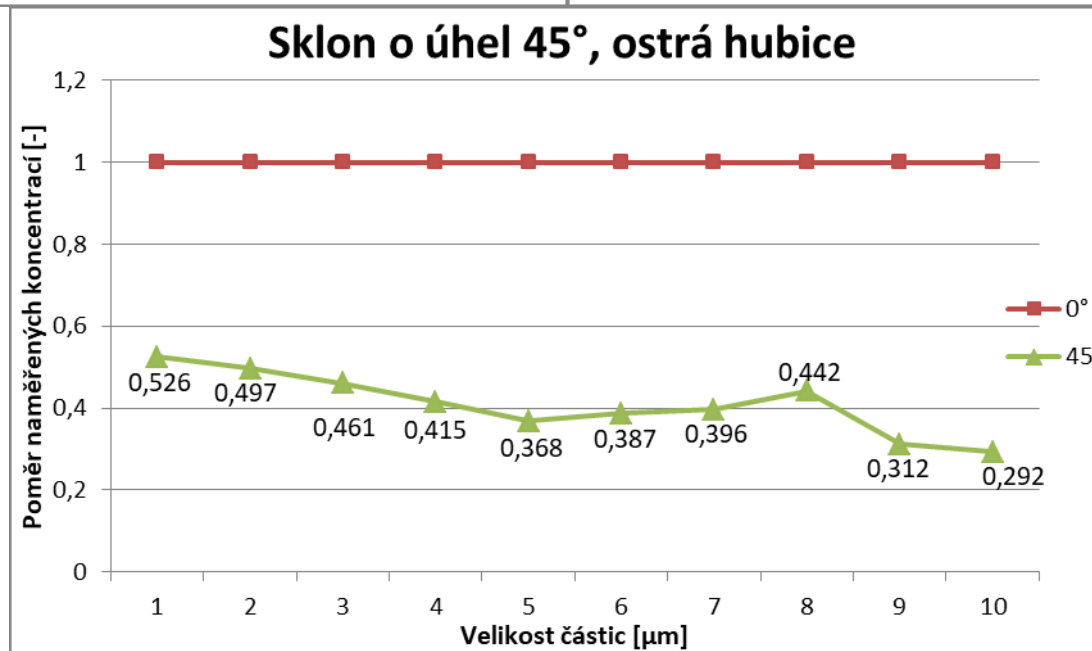
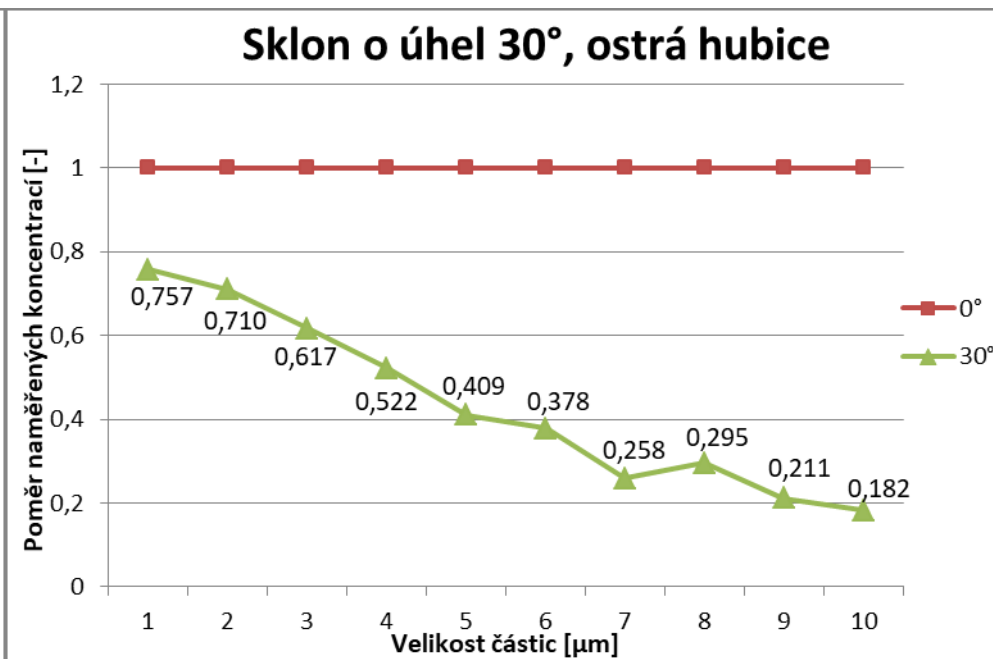
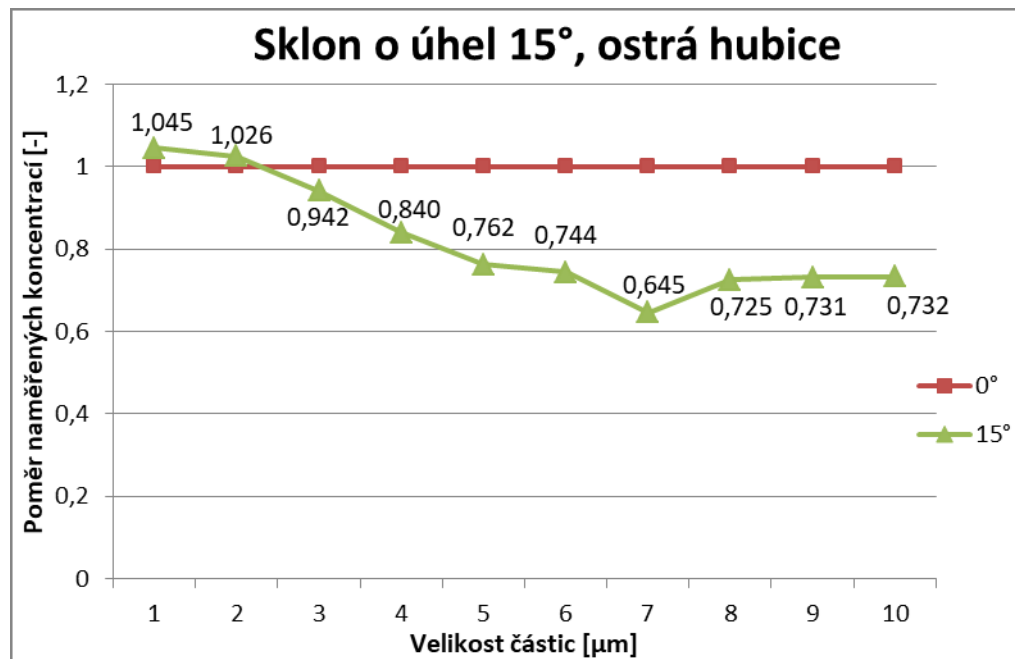




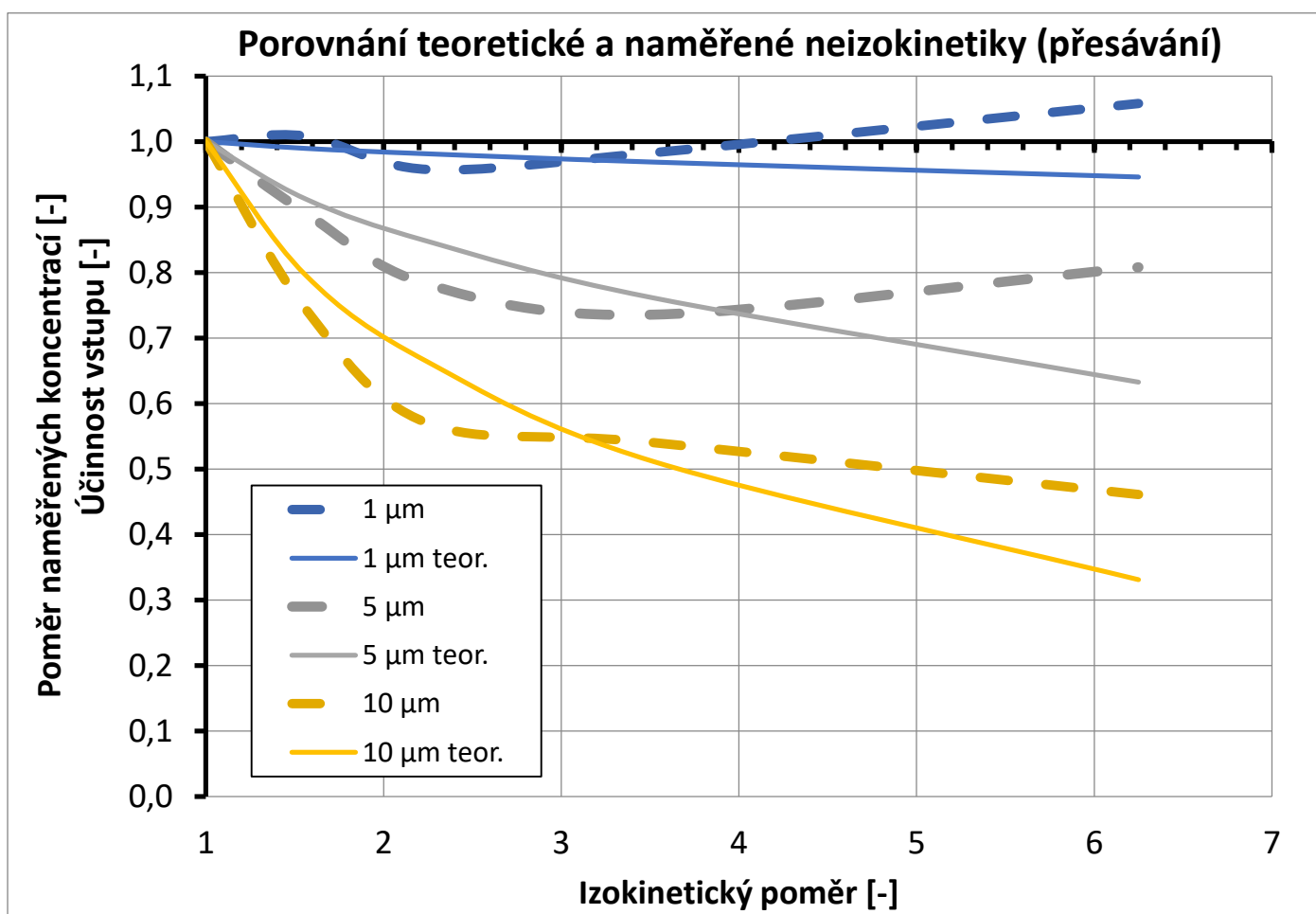
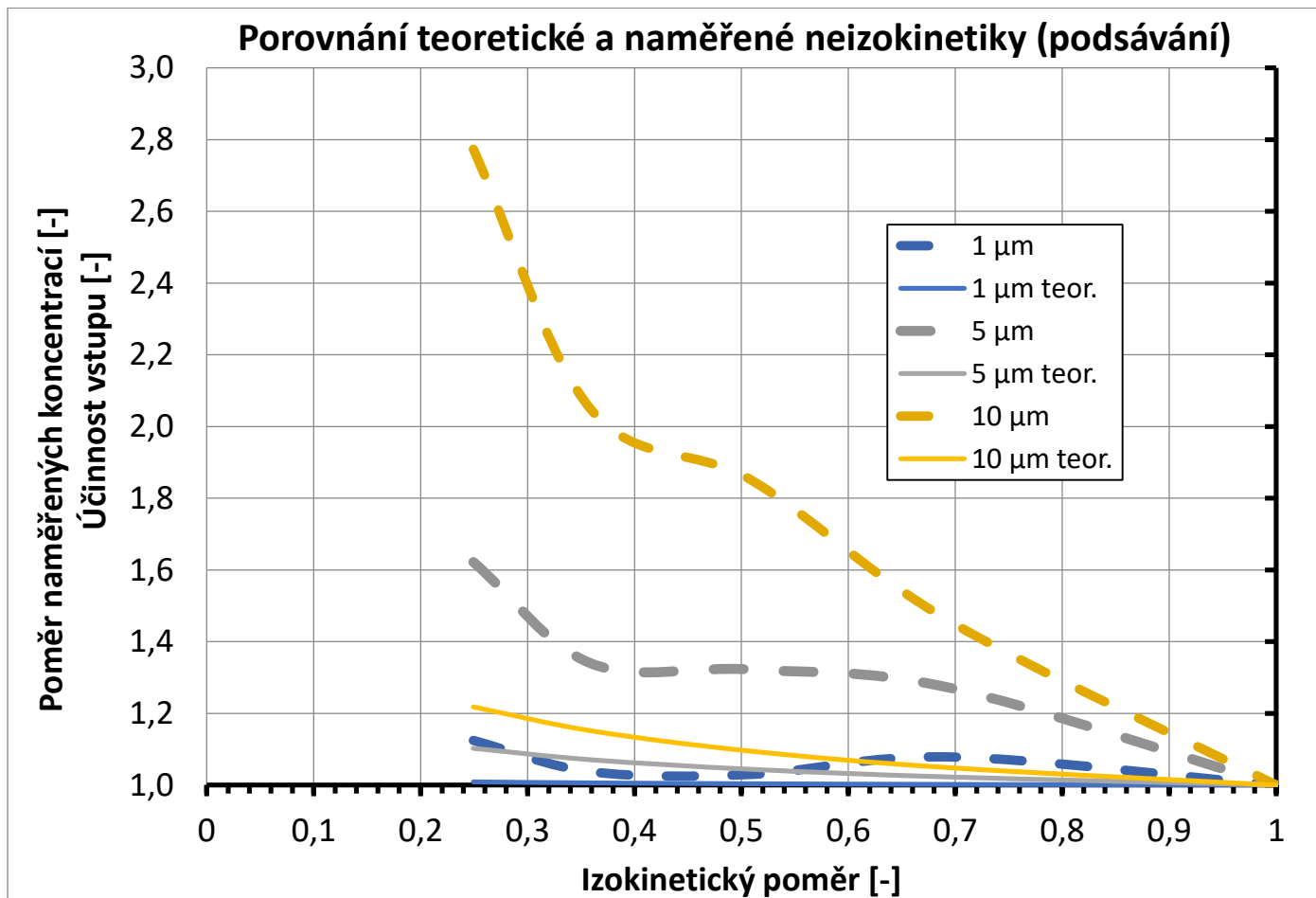
Příloha 4: Sub-izokinetické odběry ostrými hubicemi



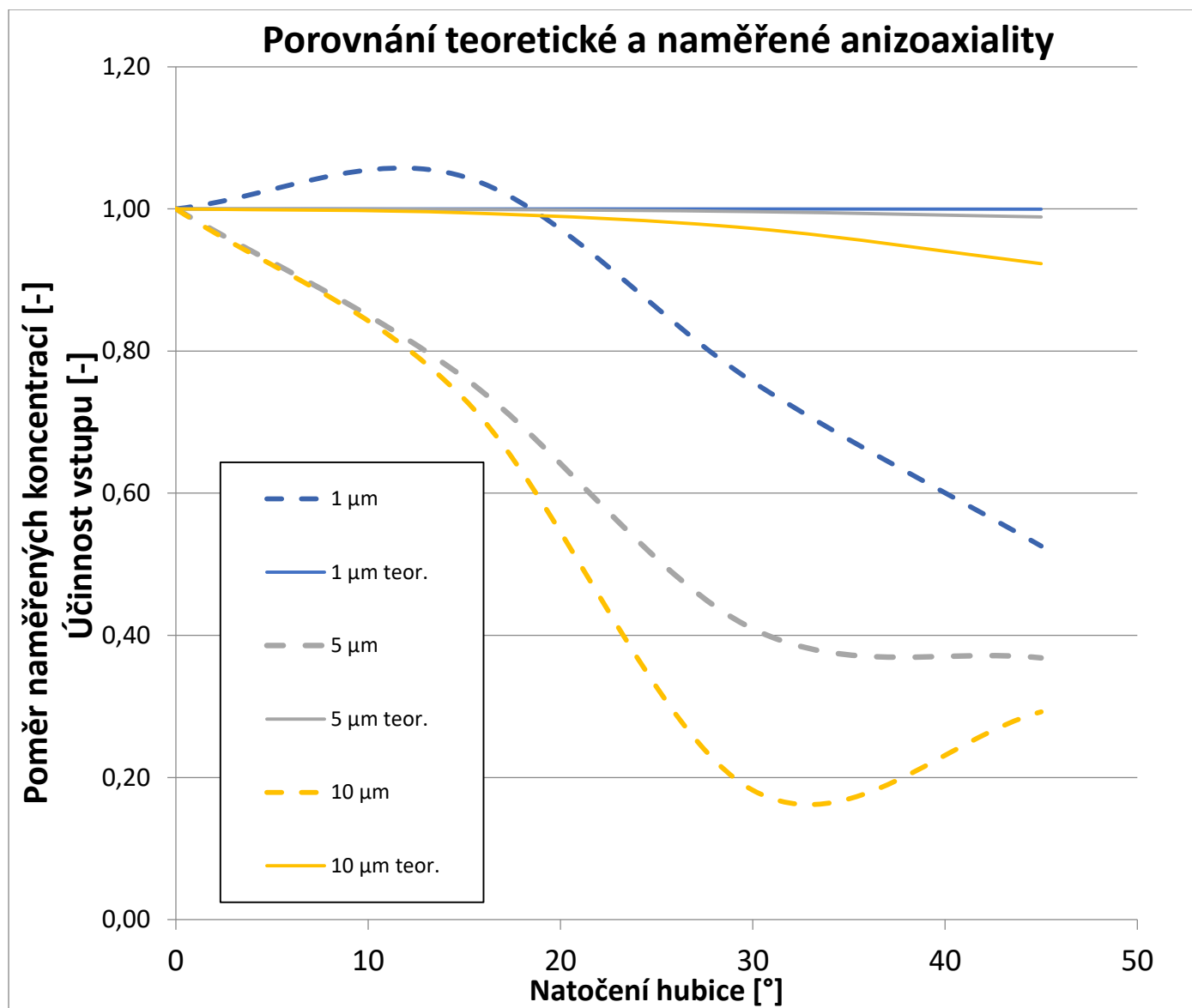
Příloha 5: Super-izokinetické odběry ostrými hubicemi



Příloha 6: Anizoaxiální odběry ostrými hubicemi



Příloha 7: Srovnání naměřených a teoretických neizokinetických dat



Příloha 8: Srovnání naměřených a teoretických anizoaxiálních dat

F



				Materiál 11 523		Tř. odpadu 001	Úprava hran Promítání 	Měřítko 2:1			
				Položovar				Přesnost ISO 2768-mk			
				Čistá hmotnost	Hrubá hmotnost			Tolerování ISO 8015			
Index	Popis změny		Dne	Podpisy							
Oddělení Katedra Ener.		Technický referent	Druh dokumentu výrobní		Status dokumentu odevzdáno	Soubor	Č. sestavy	Č. seznamu položek			
		Kreslil Jakub Kadlíček	Název, doplňující název				Č. dokumentu				
		Přezkoušel	Odběrová hubice				Změna	Datum vydání 26.4.2019	Jazyk cs	Formát A4	List 1/1